

ESCOLA SUPERIOR D'AGRICULTURA DE BARCELONA



Producción de Ulva a partir de un sistema de recirculación acuícola

Condiciones hidrodinámicas y eliminación de nutrientes

Estudiante: Samuel Machado Morenol

Tutor: Joan Oca Baradad

Universidad Politécnica de Cataluña



Castelldefels, Septiembre de 2015

Resumen

El uso de las macroalgas en las últimas décadas se ha acrecentado de una manera más que notoria. Su principal aplicación pasa por la utilización de éstas como biofiltros, que ha demostrado con creces su eficacia en la retirada de nutrientes del agua, siendo de utilidad en el tratamiento de efluentes de instalaciones acuícolas y con la posibilidad de integrar su cultivo en sistemas de recirculación. Pero además, ofrecen un valor añadido a la acuicultura como subproducto de ésta, ya que presentan un amplio abanico de usos.

En el desarrollo de este proyecto se analizaron las características hidrodinámicas de tres modelos de tanques diferentes. Dos de ellos presentan un sistema que funciona mediante la entrada de un caudal de agua que genera una fuerza impulso sobre una superficie curva y que permite mantener en suspensión y en un movimiento de rotación las macroalgas en cultivo, de manera que puedan aprovechar la radiación disponible en la superficie. El tercero funciona mediante un caudal de aire inyectado desde la parte inferior del tanque generando el mismo efecto.

Se tuvieron en cuenta para el análisis: la relación entre el flujo de entrada de agua o de aire y la velocidad de rotación alcanzada por la biomasa, la relación entre la potencia necesaria para iniciar y mantener en rotación las algas, y la concentración de biomasa.

Se realizó una comparación del comportamiento de dos especies de *Ulva*, *Ulva ohnoi* y *Ulva fasciata*, que presentan diferentes morfologías. Se observaron diferencias importantes en la distribución de la biomasa en el tanque, siendo *Ulva ohnoi* con una morfología laminar libre, sin talo, la que se distribuyó de manera más uniforme, aprovechando de manera más eficiente la radiación disponible en la superficie.

También se llevó a cabo un cultivo de *Ulva fasciata* durante 10 semanas en un tanque de aireación para determinar la evolución de la biomasa a diferentes parámetros de cultivo y estimar así la viabilidad de su posible utilización en sistemas de recirculación acuícola, ya que es un alga que no se ha utilizado todavía en sistemas de IMTA (Acuicultura Multitrófica Integrada).

Abstract

The use of seaweed has increased notoriously since 1990's. Its main application is its utilization as a biofilter, since it has a great ability to capture nutrients from water, being useful in the treatment of effluents from aquaculture facilities and offering the possibility integrating its culture in recirculated systems. Moreover, they add an additional value to the aquaculture as a by-product, since it has a wide range of uses.

The hydrodynamics of different models of tanks was analyzed. Two of them have a system that operates by water flow input, generating a inlet impulse force on a curved surface which keeps in suspension and in a rotational movement. This fact enhances the ability of seaweed to absorb radiation from the surface. The third model operates with an aeration system which injects an air flow from the bottom of the tank generating the same effect.

The relationship between the inlet force exerted by the water inlet jet and the rotational speed of the algae biomass were taken into account, and also the relationship between the minimal forces needed to start the seaweed rotation and the amount of biomass.

A comparison of the behavior of two species of *Ulva*, *Ulva ohnoi* and *Ulva fasciata*, having different morphologies was performed. Significant differences in the distribution of biomass in the tank were observed. *Ulva ohnoi*, a free laminar morphology, which was distributed more evenly using more efficiently the available radiation on the surface.

Ulva fasciata was cultured for 10 weeks in an aeration tank to determine the evolution of the biomass at different parameters, and thus estimate its possible use in a recirculated system in aquaculture, since it hasn't been used in IMTA system yet.

Resum

L'ús de les macroalgues a l'última dècada s'ha incrementat de manera notòria. La seva principal aplicació passa per la utilització d'aquestes com a biofiltres, que han demostrat la seva eficàcia en l'extracció de nutrients de l'aigua, convertint-se en un instrument molt important en el tractament d'efluents d'instal·lacions aquícoles i amb la possibilitat d'integrar el seu cultiu a sistemes de recirculació. A més, ofereixen un valor afegit a la aquicultura com a subproducte d'aquesta, ja que presenten un gran ventall d'usos.

En el desenvolupament d'aquest projecte es varen analitzar les característiques hidrodinàmiques de tres models de tanc diferents. Dos d'ells, presenten un sistema que funciona mitjançant l'entrada d'un cabal d'aigua que genera una força d'impuls sobre una superfície corba i que permet mantenir en suspensió i en un moviment de rotació les macroalgues en cultiu, de manera que puguin aprofitar la radiació disponible a la superfície. El tercer model, funciona mitjançant un cabal d'aire injectat des de la part inferior del tanc que acaba generant el mateix efecte.

Es van tenir en compte, per a la realització de l'anàlisi hidrodinàmic, la relació entre la força d'entrada d'aigua o aire i la velocitat de rotació; y la relació entre les forces mínimes necessàries per iniciar i mantenir en rotació la concentració de biomassa al tanc.

Es va realitzar una comparació del comportament de diferents espècies de *Ulva*, *Ulva ohnoi* i *Ulva fasciata*, que presenten diferents morfologies. Es van observar diferències importants en la distribució de la biomassa en el tanc. *Ulva ohnoi*, amb una morfologia laminar lliure, sense tal·lus, va ser la que es va distribuir de manera més uniforme, aprofitant així de manera més eficient la radiació disponible a la superfície.

També es va realitzar un cultiu d'*Ulva fasciata* durant 10 setmanes en un tanc d'airejament per a multiplicar la seva biomassa i determinar la seva evolució davant diferents paràmetres de cultiu, podent així estimar la seva viabilitat per una possible utilització a sistemes de recirculació aquícola, ja que és una alga que no s'ha utilitzat encara en sistemes de IMTA.

Agradecimientos

A mi familia, por animarme a seguir estudiando y apoyarme en todo momento; a **Joan Oca** por su paciencia, su ayuda y sus horas de dedicación; a **Ingrid Masaló** por sus consejos y su ayuda; a **Antoni Maria Claret Verdú, Maite Mas y Rosa Carbó**, por su ayuda en la identificación de diferentes especies de epífitas y su apoyo en el laboratorio; a **Javier Cremades** por su ayuda en la identificación de las algas, de epífitas y sus consejos; a **Patricia Jiménez, Maria Rodríguez, Maria Julià y Olga Gener** por su ayuda en los análisis químicos y con el material de laboratorio.

Contenido

Resumen	2
Abstract	3
Resum	4
Agradecimientos.....	5
1. Introducción.....	8
1.1. Introducción general.....	8
1.2. Importancia de las macroalgas	8
1.2.1. La industria de las macroalgas.....	8
1.2.2. Aplicaciones de las macroalgas	10
1.2.3 Técnicas de cultivo	11
1.2.4 Acuicultura multitrófica integrada.....	12
1.3. Objetivos	13
2. Material y métodos	14
2.1. Características de la instalación.....	14
2.2. Especies de cultivo	14
2.3 Manejo de las algas.....	16
2.4. Diseño experimental.....	17
2.4.1. Caracterización hidrodinámica de los tanques	17
2.4.2. Fase de cultivo con <i>Ulva fasciata</i>	21
2.4.3. Crecimiento	23
2.4.4 Epifitismo	23
2.4.5. Eliminación de N-NO^{-3}	24
2.4.6. Eliminación de P	26
3. Resultados y discusión.....	27

3.1. Caracterización hidrodinámica de los diferentes modelos de tanque.....	27
3.1.1. Valoración hidrodinámica para el modelo 1.....	27
3.1.2. Valoración hidrodinámica para el modelo 2.....	29
3.1.3. Valoración hidrodinámica para el modelo 3.....	30
3.3. Comparación del sistema de aireación con el sistema de impulso de entrada de agua	32
3.2. Comparación del comportamiento de la biomasa en función de su morfología..	33
3.2.1. Comparación para el modelo 1.....	33
3.2.2. Comparación para el modelo 3.....	37
3.4. Crecimiento.....	40
3.5. Epifitismo	43
3.6. Eliminación de NO_3^-	44
3.7. Eliminación de P.....	46
Conclusiones.....	48
Bibliografía.....	50
Anexos	53
Anexo 1	53
Anexo 2	54

1. Introducción

1.1 Introducción general

La acuicultura es un sector que ha experimentado un gran auge en las últimas décadas. Este hecho se debe al aumento en la demanda de proteína animal que ha generado el aumento de la población y las dificultades de los demás sectores de abastecerla. Esto ha convertido a la acuicultura en un gran pilar económico y de gran importancia en muy poco tiempo (Ortega y Ochoa , 2009).

1.2 Importancia de las macroalgas.

Las macroalgas son un conjunto de vegetales talófitos cuyo ciclo biológico se desarrolla en el medio acuático. Están provistas de pigmentos que les permiten un modo de alimentación autótrofa y en alguna fase de su ciclo de vida permanecen fijadas al substrato marino, creando biotopos naturales más o menos homogéneos. Las algas, además de su gran interés ecológico, son los principales productores primarios del planeta y un recurso económico natural que presenta un amplio abanico de usos.

Existen tres grupos de macroalgas: las feofíceas, las rodofíceas y las clorofíceas. Se distinguen entre ellas por su color, que puede ser marrón, rojo y verde respectivamente. El tamaño que pueden alcanzar abarca un amplio rango de posibilidades que va desde unos pocos centímetros hasta incluso 30 metros. Además, algunas especies presentan tejidos diferenciados, en especial el de fijación al fondo marino.

Existen diferentes estrategias adaptativas y pueden presentar diferentes morfologías dependiendo de las condiciones de oleaje o corrientes marinas. En condiciones adversas son capaces de ralentizar su metabolismo y de reproducirse mediante la generación de zoosporas o vegetativamente.

1.2.1. La industria de las macroalgas.

La industria de las macroalgas ha aumentado mucho en las últimas décadas como puede observarse en la tabla 1, por ejemplo la demanda de sistemas de biofiltración por parte de las industrias acuícolas y no acuícolas, ya que estas son excelentes captadores de nutrientes del agua, en especial de N y P. Son también de gran utilidad para evitar problemas de eutrofización en ecosistemas costeros (Neori *et al.*, 2000).

Se estima que este sector presenta el crecimiento más rápido en cuanto a producción de alimentos del mundo. En 2012 se produjeron casi 23,8 millones de toneladas de algas a nivel mundial con un incremento de producción del 116% respecto a los 9,3 millones de toneladas producidas diez años antes. Esta industria

tiene un valor anual de 5,5 millones de dólares, de los cuales el 83,33% provienen de productos para la alimentación humana (FAO, 2014).

Tabla 1. Muestra la producción acuícola de plantas acuáticas cultivadas en el mundo y en algunos productores principales

		1990	1995	2000	2005	2010	2012
China	Volumen (toneladas)	1 470 230	4 162 620	6 938 095	9 494 591	11 092 270	12 832 060
	Proporción del total mundial (porcentaje)	39,05	60,78	74,55	70,23	58,35	53,97
Indonesia	Volumen (toneladas)	100 000	102 000	205 227	910 636	3 915 017	6 514 854
	Proporción del total mundial (porcentaje)	2,66	1,49	2,21	6,74	20,59	27,40
Filipinas	Volumen (toneladas)	291 176	579 035	707 039	1 338 597	1 801 272	1 751 071
	Proporción del total mundial (porcentaje)	7,73	8,45	7,60	9,90	9,48	7,36
República de Corea	Volumen (toneladas)	411 882	649 099	374 463	621 154	901 672	1 022 326
	Proporción del total mundial (porcentaje)	10,94	9,48	4,02	4,59	4,74	4,30
Japón	Volumen (toneladas)	565 387	569 489	528 881	507 742	432 796	440 754
	Proporción del total mundial (porcentaje)	15,02	8,31	5,68	3,76	2,28	1,85
Malasia	Volumen (toneladas)	...	...	16 125	40 000	207 892	331 490
	Proporción del total mundial (porcentaje)			0,17	0,30	1,09	1,39
Zanzíbar (República Unida de Tanzania)	Volumen (toneladas)	8 080	39 170	49 910	73 620	125 157	150 876
	Proporción del total mundial (porcentaje)	0,21	0,57	0,54	0,54	0,66	0,63
Islas Salomón	Volumen (toneladas)	...	...	...	3 260	8 000	13 000
	Proporción del total mundial (porcentaje)				0,02	0,04	0,05
Subtotal	Volumen (toneladas)	2 846 755	6 101 413	8 819 740	12 989 600	18 484 076	23 056 431
	Proporción del total mundial (porcentaje)	75,60	89,08	94,77	96,08	97,24	96,97
Resto del mundo	Volumen (toneladas)	918 570	747 802	486 302	529 346	525 591	720 018
	Proporción del total mundial (porcentaje)	24,40	10,92	5,23	3,92	2,76	3,03
MUNDO	Volumen (toneladas)	3 765 325	6 849 215	9 306 042	13 518 946	19 009 667	23 776 449

Fuente: FAO, 2014

1.2.2. Aplicaciones de las macroalgas.

Como se ha comentado anteriormente, la mayor parte de la producción de algas se emplea únicamente en el consumo humano. Pese a ello, las macroalgas presentan multitud de propiedades y compuestos muy interesantes para diferentes sectores de la economía como la alimentación animal, químicos, cosméticos y demás productos farmacéuticos (Bowles, 2007)

Uno de los principales usos que se pueden dar a las macroalgas es el aprovechamiento de su capacidad para acumular diferentes nutrientes y contaminantes. Esto hace que tengan un importante papel en el desarrollo de biofiltros para aguas residuales, ya procedan de industrias, de explotaciones acuícolas o de explotaciones agrícolas (Cole *et al.*, 2014). Por ejemplo, debido al crecimiento que ha experimentado la acuicultura, el nivel de fósforo y nitrógeno inorgánico en el agua se ha visto incrementado de manera importante (Wu Hailong *et al.*, 2015). Acompañado por el vertido de materia orgánica generado también por esta producción intensiva, favorecen las condiciones idóneas para que se produzcan procesos de eutrofización en lagos, costas y estuarios (Chávez-Crooker P *et al.*, 2010). Con la biofiltración mediante macroalgas de los nutrientes como N y P, se consigue una elevada proporción de proteína en éstas que permite su utilización en la fabricación de piensos (Valente *et al.*, 2006). Además, también son capaces de acumular algunos contaminantes como metales pesados, siendo de utilidad para tratar efluentes de diferentes industrias (Vijayaraghavan *et al.*, 2014).

Otra de las principales aplicaciones de las macroalgas es el aprovechamiento de diferentes componentes que pueden generar éstas y que presentan diferentes aplicaciones en la industria alimentaria (Lordan *et al.*, 2011). Entre estos componentes destacan diferentes antioxidantes, vitaminas, proteínas, ácidos grasos y polisacáridos (Lordan *et al.*, 2011; Pereira *et al.*, 2012). Cabe destacar la presencia de un polisacárido con múltiples usos presente sobre todo en el género *Ulva*, al que se conoce como ulvan. Este polisacárido presenta muchas aplicaciones en diferentes industrias como la producción de anticoagulantes, antioxidantes, inmunomoduladores, antihipercolesterolémicos, antihiperlipidémicos, antivirales, antitumorales y sirve también como elicitador en defensa en plantas. Además se utiliza en la fabricación de biomateriales como nanofibras, macropartículas, medios de cultivo celular, antiadhesivos e hidrogeles (Coste *et al.*, 2015).

Se ha estudiado también el potencial de las algas en el desarrollo de biocombustibles, convirtiéndolas en una posible fuente renovable en la producción de biogás (Alvarado-Morales *et al.*, 2013).

1.2.3 Técnicas de cultivo

El cultivo de algas o ficocultura se ha convertido en una parte muy importante de la producción acuícola. Se estima que el 70% de las algas marinas utilizadas proceden de sistemas de producción. Estos llegan a representar el 50% de la acuicultura marina. Las diferentes técnicas de cultivo han ido variando durante los últimos años y el crecimiento experimentado ha sido muy notable. Las algas presentan diferentes aspectos que facilitan mucho su cultivo, como la ausencia de diferenciación de tejidos, cosa que facilita la propagación vegetativa, la maleabilidad de sus ciclos de reproducción y la variabilidad de su metabolismo, con capacidad de producir diferentes componentes dependiendo del sistema de cultivo empleado.

No obstante, es necesario conocer a fondo la biología y características de las especies de cultivo. Esto permitirá la realización de cultivos de manera efectiva, controlada y segura.

Las principales técnicas de cultivo de macroalgas pueden dividirse en dos grandes grupos: ficocultura extensiva, que se caracteriza por favorecer la extensión de las poblaciones naturales aumentando superficies de fijación y diseminando plántulas, con el objetivo de que las especies se naturalicen; y la ficocultura intensiva, donde todo el proceso de crecimiento y producción está controlado por el hombre. La ficocultura se puede realizar tanto en mar abierto como en tierra.

Ficocultura en mar: esta técnica de cultivo está ideada para especies capaces de reproducirse vegetativamente. Se realiza la siembra de fragmentos de alga en cuerdas y piquetas en mar abierto. Es una técnica poco costosa pero que necesita una abundante mano de obra. Debe realizarse en zonas poco profundas y presenta varios inconvenientes, como la susceptibilidad a fenómenos naturales impredecibles o a patologías y pandemias.

Ficocultura mixta planta-mar: se trata del cultivo de plántulas en laboratorio para su posterior trasplante a mar abierto fijándolas sobre un cabo portador. Está diseñada para especies de algas que no pueden reproducirse vegetativamente. Presenta los mismos inconvenientes que la ficocultura en mar.

Ficocultura en planta: todo el proceso de cultivo se realiza en tierra. Es un sistema de cultivo muy caro y con la necesidad de mano de obra muy cualificada. Tiene la ventaja de que todos los parámetros de cultivo están muy controlados y todos los procesos mecanizados. Actualmente se llevan a cabo sobre todo de manera experimental, dada su baja productividad, pero presenta unas perspectivas de futuro muy alentadoras para la acuicultura debido a que las algas poseen, como hemos comentado anteriormente, un potencial muy interesante como biofiltro en efluentes con un alto contenido de nutrientes.

Este hecho provoca un gran interés en el desarrollo de sistemas de cultivos para algas con el objetivo de poder integrarlo al cultivo de peces, buscando conseguir un sistema cerrado donde se tenga un balance de nutrientes, un control de los residuos muy exhaustivo y que haga de la acuicultura un sistema de producción mucho más sostenible.

1.2.4. Acuicultura multitrófica integrada (ITMA).

La acuicultura multitrófica integrada surge de la necesidad de tratar los efluentes de la producción acuícola, que ha aumentado sin cesar en las últimas décadas. Este hecho ha provocado que los vertidos de nutrientes y materia orgánica se multipliquen de manera muy notoria, cosa que favorece los procesos de eutrofización, muy perjudiciales para lagos, ecosistemas costeros y estuarios. Debido a este fenómeno, se presenta la necesidad de mejorar las técnicas de cultivo evolucionando a prácticas más sostenibles (Fei Xiugeng, 2004). Éstas se basan en la integración del cultivo de diferentes especies con la finalidad de crear un sistema donde el flujo de nutrientes excretado por la producción de peces sea aprovechado por otras especies de interés comercial como las algas, además del aprovechamiento de la materia orgánica por parte de otros organismos filtradores de interés, como los moluscos, generando así un sistema de cultivo sostenible (Neori *et al.*, 2004). Con este tratamiento, los efluentes pueden ser devueltos a los tanques de cultivo de peces, sin necesidad de verterlos como residuos y conseguir así un sistema de recirculación cerrado (Abreu *et al.*, 2011).

Para llevar a cabo con éxito esta integración en la acuicultura tradicional, es necesario seguir diferentes directrices. Tales como 1) la utilización de especies de cultivo adaptadas a las diferentes áreas de producción, que aseguren unas tasas de crecimiento elevadas, una producción durante todo el año y tengan un valor de mercado como subproducto de la acuicultura; y 2) el desarrollo de una legislación que regule este ámbito dando flexibilidad a prácticas experimentales e innovadoras a escala pre industrial (Chopin *et al.*, 2001).

Los sistemas de cultivo IMTA permiten el aprovechamiento de las excreciones generadas por los cultivos de peces. De esta manera, esos desechos pasan a formar parte del sistema de cultivo de otros organismos de interés, que ofrecen un subproducto a la acuicultura muy interesante. Además, se disminuye la necesidad de renovación de agua en sistemas de cultivo acuícolas, cosa que permitiría realizarlos independientemente de la influencia del medio. Este hecho facilitaría los cultivos acuícolas en el interior, ya que los costes de producción disminuirían al no verse ligados a una renovación de agua constante. Por último, estos sistemas ofrecen la posibilidad de desarrollar una acuicultura mucho más sostenible, con un control mucho más exhaustivo de los residuos generados.

1.3. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo consistirá en la caracterización hidrodinámica de diferentes modelos de tanques destinados a la producción de algas. Para ello, previamente, se llevará a cabo un cultivo con *Ulva fasciata* procedente de la playa del Prat del Llobregat (Barcelona) con la finalidad de obtener la biomasa necesaria para la valoración de los diferentes modelos de tanque. Este proceso de producción de biomasa permitirá abordar un segundo objetivo consistente en el estudio de comportamiento de *Ulva fasciata* en condiciones de cultivo intensivo.

Los objetivos específicos de este trabajo serán:

1. Evaluación del comportamiento hidrodinámico de las algas en los diferentes modelos de tanques y a diferentes densidades de cultivo.
2. Comparación del comportamiento de la biomasa en los diferentes modelos de tanques para diferentes morfologías de alga.
3. Comparación de los requerimientos de potencia para los dos sistemas de impulsión utilizados: aireación e impulsión de agua.
4. Evaluación de la viabilidad de *Ulva fasciata* para sistemas de cultivo de IMTA.

2. Material y métodos

2.1. Características de la instalación

Durante la realización del cultivo de *Ulva fasciata* la instalación disponía de 2 tanques de cultivo para peces, un tanque con un biofiltro y dos filtros de malla instalados en paralelo. La renovación de agua del sistema durante este periodo fue muy baja, acumulando así nitrógeno, en forma de nitrato, y fósforo, en forma de fosfatos. No se disponía de un intercambiador de calor para mantener una temperatura constante, cosa que provocó que la temperatura oscilase entre 13,5 °C, en invierno, y 22,5 °C, en verano. Para el cultivo de algas se disponía de 3 tanques cilíndricos con un sistema de aireación, con una superficie de 0,32 m² y una capacidad de 90 L; 3 tanques cuadrados con una sección semicircular, de 0,16 m² de área y una capacidad de 40 L con un funcionamiento por impulsión de agua; y un tanque cuadrado con una sección semicircular, una superficie de 0,64 m² y una capacidad de 172 L, con un funcionamiento por impulsión de agua. Únicamente uno de los tanques con capacidad de 40 L estaba conectado directamente al sistema de cultivo de peces.

El cultivo de peces estaba formado por un tanque con una población de 40 lenguados (*Soleo senegalensis*), llegando a una biomasa aproximada de 4 Kg, y un tanque con 29 lubinas (*Dicentrarchus labrax*), alcanzando una biomasa aproximada de 15 Kg. Generalmente, la alimentación se realizó entre las 8:00h y las 10:00h. El volumen total de agua de la instalación fue de aproximadamente 980 L para el cultivo de peces.

El cultivo de algas se realizó tanto en el interior como en el exterior del laboratorio variando por periodos la intensidad lumínica, el tipo de luz utilizada y el fotoperiodo.

2.2 Especies de cultivo (algas)

En este proyecto se realizaron dos fases experimentales. La primera de ellas fue la caracterización hidrodinámica de los diferentes modelos de tanques propuestos en el apartado 2.5 y el comportamiento que adquieren dos especies diferentes del género *Ulva*, *U. ohnoi* y *U. fasciata*, que presentan morfologías diferentes. La segunda fue la determinación de los parámetros que favorecen un mayor crecimiento y una mayor tasa de eliminación de nutrientes del agua con las condiciones que ofrecen las instalaciones de las que se disponen.

Para la fase experimental de crecimiento y eliminación de nutrientes se empleó *Ulva fasciata* debido al fácil acceso que se tiene a esta especie, ya que se ha localizado un yacimiento de ésta cercano a las instalaciones donde se lleva a cabo el proyecto. Se localizó el 15/10/2014 en un espigón que se encuentra en la playa de el Prat del

Llobregat (41°16'37.0"N 2°04'28.2"E). La muestra utilizada para este proyecto fue recolectada el 16/03/2015.

Ulva fasciata es una clorófita perteneciente a la clase de las *Ulvophyceae*, al orden de las Ulvales y al género *Ulva*. Es una macroalga laminar distrómica con una distribución que abarca una gran extensión colonizada por todo el planeta, sobre todo en las zonas de aguas templadas y tropicales (Aguilar-Rosas *et al.*, 2005) siendo la zona dónde se produce una mayor proliferación de ésta en el sudeste asiático (Hayden *et al.*, 2003, Shao Ping *et al.*, 2015). Presenta una gran plasticidad en lo que a la morfología se refiere, dependiendo ésta de muchos factores como las corrientes de agua, la salinidad o la presencia de nutrientes. Además puede vivir anclada a un sustrato o flotando libremente (Hayden *et al.*, 2003).

Presenta una morfología con un talo central, distromático, con una longitud de 3-72 cm, de color verde oscuro o color amarillento, que es capaz de adherirse al sustrato mediante la generación de un disco basal. Presenta una base cuneiforme que se amplía en la parte superior, dividida en diferentes lóbulos o segmentos que pueden tener un ancho de 1 a 4 cm (Aguilar-Rosas *et al.*, 2005).



Fotografía 1. *Ulva fasciata*.

La muestra recogida para la realización de los diferentes experimentos propuestos presenta una morfología de individuo completo constituida por un talo y diferentes láminas de *Ulva* que se extienden a lo largo de él.

La segunda especie del género *Ulva* utilizada fue *Ulva ohnoi* (Hiraoka *et al.*, 2004), otra clorófita, perteneciente a la clase de las *Ulvophyceae*, al orden de las Ulvales y al género *Ulva*. Es un alga laminar distrómica. Ésta se encuentra localizada en las costas pertenecientes a Japón bañadas por el océano pacífico (Hiraoka *et al.*, 2004). La biomasa utilizada para este proyecto fue recuperada de un proyecto anterior, en el cual obtuvieron las muestras recogidas en los efluentes de las instalaciones del IRTA (Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaria) de Sant Carles de la Ràpita, en el

delta del Ebro. Se realizó una determinación mediante una secuenciación genética en el departamento de biología animal, vegetal y economía de la Universidad de A Coruña por el Dr. Javier Cremades.



Fotografía 2. *Ulva ohnoi*

En esta ocasión, *Ulva ohnoi* presenta una morfología con ausencia de talo central, desde el cual se prolongan los diferentes lóbulos de *Ulva*, y que le permite mantenerse en suspensión libremente, hecho que será utilizado para realizar la comparación de comportamiento según la morfología con la especie *Ulva fasciata* que presenta una morfología de individuo completo con presencia de talo central y ramificada en lóbulos.

2.3 Manejo de las algas

Para introducir la biomasa en la instalación de cultivo, se realiza un proceso de desinfección aplicando un tratamiento a baja salinidad que provoca un choque osmótico, con la finalidad de eliminar posibles patógenos. *Ulva* sp. es un género que aguanta bien las variaciones de la salinidad del medio ya que se encuentra presente en muchos estuarios, donde este fenómeno se produce a menudo (Bolton *et al.*, 2008).

Cada 7 días se realiza un control de crecimiento de la biomasa para obtener las tasas de crecimiento semanal donde se extrae y pesa la biomasa presente en los diferentes tanques de cultivo. Este momento se aprovecha para llevar a cabo la desinfección de las algas y los tanques utilizando para ello una dilución de lejía (hipoclorito sódico 40 g L⁻¹ de cloro activo) 1/1000, durante un minuto en el caso de las algas. A continuación se realiza un aclarado con agua para evitar que permanezcan restos de lejía en la biomasa o en los tanques, ya que ésta es muy perjudicial para los peces.

2.4 Diseño experimental

El objetivo principal es la caracterización hidrodinámica de los diferentes modelos de tanques. Pese a ello se realizó una fase previa de cultivo de *Ulva fasciata*, ya que no se disponía de suficiente biomasa para realizar la caracterización. Se aprovechó esta fase de cultivo para observar la viabilidad en la integración de *Ulva fasciata* a sistemas de IMTA, ya que esta especie no se ha utilizado en este tipo de sistemas.

2.4.1 Caracterización hidrodinámica de los diferentes modelos de tanque.

En este estudio se presentan tres modelos de tanques diferentes enfocados al cultivo de algas. Éstos están basados en la utilización de la fuerza de impulso generada por la entrada de un caudal de agua o aire. La finalidad de este sistema es mantener las macroalgas en suspensión y en un movimiento constante de rotación dentro del tanque para facilitar la absorción de luz que llega a la superficie de éste, ya que hemos de tener en cuenta que a densidades elevadas de cultivo y dependiendo de la morfología del alga, la penetración de la luz no supera los 5 cm.

Modelo 1 y 2

El modelo de tanque número 1 está construido con polietileno. Presenta una superficie cuadrada de $0,16 \text{ m}^2$ y tiene un fondo semicilíndrico con una capacidad de 40 L.

La entrada de agua al tanque se construyó utilizando tubo de PVC de 20 mm. Los orificios se realizaron mediante perforación y adaptando una boquilla de aspersor cada uno de ellos con un diámetro de 2,7 mm. El tanque presenta 5 orificios equidistantes entre ellos a lo largo de toda la tubería de entrada.

La salida de agua está situada al nivel de la entrada de agua en el tanque con un sistema de filtración previo. Este sistema de filtración está constituido por una placa de polietileno perforada en su totalidad con un diámetro de orificio de 4 mm. De esta manera se impide la pérdida de biomasa por el desagüe del tanque.

El modelo de tanque número 2 está construido con polietileno. Presenta una superficie cuadrada de $0,64 \text{ m}^2$ y una sección semicircular con una capacidad de 172 L.

La entrada de agua al tanque se construyó utilizando tubo de PVC de 25 mm. Los orificios se realizaron mediante perforación y adaptando una salida de riego a cada uno de ellos con un diámetro de 2,7 mm. El tanque presenta 10 orificios equidistantes entre ellos a lo largo de toda la tubería de entrada.

Este modelo presenta dos salidas de agua para evitar que la distribución de las algas que se genera se vea desplazada hacia la salida de agua. Al igual que el modelo

número 1 presenta un sistema de filtración en cada una de las salidas constituido por una placa de polietileno perforada con un diámetro de orificio de 4 mm.

El movimiento se consigue proyectando la salida de agua sobre la superficie curva del tanque, de manera que éste provoca un movimiento de rotación horizontal del flujo.

La fuerza de impulso (Fi) que mantendrá el movimiento de rotación será función de la velocidad de entrada y del caudal.

$$Fi = Qvp \quad \text{ec. 1}$$

Donde: Fi es la fuerza de impulso; Q es el caudal de entrada; v es la velocidad de entrada de cada caño y p la densidad del fluido.

$$Fi = \frac{4Q^2\rho}{n\pi d^2} \quad \text{ec. 2}$$

Donde: d es el diámetro de salida de cada chorro; n es el número de chorros.

Esta Fi provocará un torque que será igual a esta Fi multiplicada por la distancia del eje de rotación al eje de Fi (Figura 1). Este torque en régimen permanente, equilibrará el torque en sentido contrario provocado por las fuerzas de fricción, que se producirán mayoritariamente en el perímetro exterior de la masa cilíndrica de algas.

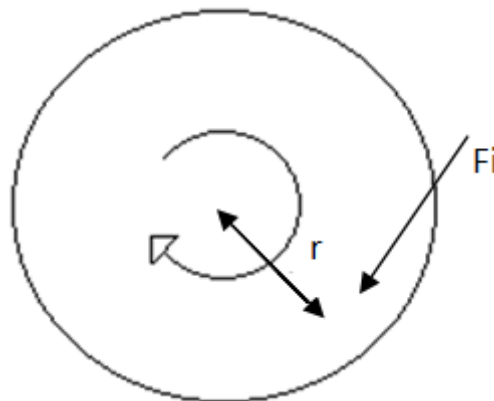


Figura 1. Representación gráfica esquemática del torque donde r es el radio y Fi fuerza de impulsión.

Para llevar a cabo la caracterización hidrodinámica del modelo 1 se realizó un estudio de la fuerza de impulso necesaria para hacer rotar las algas. Además, se estudió la influencia de la densidad de cultivo y de los caudales de entrada en la velocidad de rotación de las algas. Para ello se realizó un experimento en el que se controló la velocidad de rotación de 4 concentraciones de biomasa diferentes (90; 180; 270 y 360 g PF/tanque, que equivalen a 0,56; 1,13; 1,69 y 2,25 Kg PF m⁻²) presentes en la tabla 2. Haciendo pequeños incrementos en el caudal (de 20 L h⁻¹) se llegó a determinar la fuerza de impulso necesaria para levantar las diferentes densidades de macroalga del fondo del tanque. Una vez éstas en rotación, por cada incremento de

caudal se cronometró el tiempo que necesitaba un individuo para realizar 5 rotaciones completas, haciendo 4 repeticiones para cada uno de ellos.

Tabla 2. Comparativa de las diferentes biomásas utilizadas en los experimentos y su equivalente en escalados para el modelo 1.

Biomasa [g]	Biomasa por unidad de superficie [Kg m^{-2}]	Biomasa por unidad de volumen [Kg m^{-3}]
90	0,56	2,25
180	1,13	4,5
270	1,69	6,75
360	2,25	9

La caracterización del modelo 2, al igual que en el modelo 1, se llevó a cabo mediante un estudio de la fuerza de impulso necesaria para que la biomasa presente en el tanque comience un movimiento rotacional. En este caso, debido a limitaciones de la instalación, para evaluar el comportamiento de la biomasa a diferentes densidades para diferentes caudales de entrada, sólo se pudieron emplear dos densidades diferentes (360 y 720 g PF/tanque que equivalen a 0,56 y 1,13 Kg m^{-2}) presentes en la tabla 3. Realizando incrementos en el caudal de entrada (de 50 L h^{-1}) se llegó a determinar la fuerza de impulso mínima necesaria para poner en movimiento toda la biomasa presente en el tanque. Una vez éstas en rotación, para cada incremento de caudal se cronometró el tiempo que necesitaba un individuo para realizar 5 rotaciones completas, haciendo 4 repeticiones para cada uno de ellos.

Tabla 3. Comparativa de las diferentes biomásas utilizadas en los experimentos y su equivalente en escalados para el modelo 1.

Biomasa [g]	Biomasa por unidad de superficie [Kg m^{-2}]	Biomasa por unidad de volumen [Kg m^{-3}]
360	0.56	2.1
720	1,13	4.2

Modelo 3

El modelo de tanque número 3 está construido de fibra de vidrio cubierto por una pintura e-poxy. Tiene una superficie circular de 0,32 m^2 y forma cilíndrica con una capacidad de 90 L. La parte inferior del tanque es ligeramente cóncava y es donde se encuentra la entrada de aire, ya que este modelo funciona con aireación.

Este modelo sólo dispone de un orificio de entrada de aire que a la vez funciona como desagüe y se encuentra en la parte inferior del tanque, justo en el centro. Para que esto sea posible, se instaló una tubería que recoge el agua hasta un rebosadero de PVC que nos marca el nivel de agua del tanque y por su interior se introdujo un pequeño tubo que proporciona el caudal de aire.

En este modelo, el movimiento está generado por la fuerza de impulso, que en este caso proporciona la entrada de aire en el tanque. Sin embargo, debido a la geometría de éste, la rotación de la biomasa se produce del interior del tanque hacia el exterior. El caudal de aire mueve las masa de las algas hacia arriba, dónde una vez en la superficie del agua se desplazan hacia el exterior del tanque y bajan lindando con la pared. Gracias a la leve inclinación de la zona inferior del tanque hacia el centro, éstas se ven desplazadas hacia la impulsión de aire y de nuevo hacia la superficie del agua. La altura de agua es la mitad del radio del tanque para favorecer la rotación de las algas.

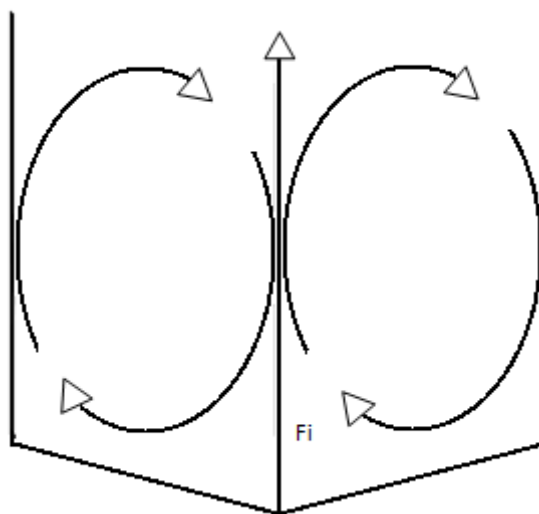


Figura 2. Descripción gráfica esquemática del movimiento generado por la fuerza de impulsión en el modelo de tanque número 3.

Para llevar a cabo la caracterización hidrodinámica del tanque, al igual que en los modelos anteriores, se realizó un estudio de la fuerza de impulso necesaria para hacer rotar las algas. Además, se siguió con el estudio del comportamiento que adoptan diferentes densidades de cultivo a diferentes caudales de aireación. Para ello, como en el caso anterior, se llevó a cabo un experimento en el cual se controlaba la velocidad de rotación de 4 concentraciones de biomasa diferentes (90; 180; 270 y 360 g PF/tanque, que equivalen a 0,28; 0,56; 0,84 y 1,13 Kg m⁻²) tabla 4. Realizando pequeños incrementos de caudal de aire (0,20 L h⁻¹) se determinó la fuerza de impulso necesaria para levantar las diferentes concentraciones de *Ulva fasciata* del fondo del tanque. Una vez éstas en rotación, por cada incremento de caudal se cronometró el tiempo que necesitaba un individuo para realizar 1 rotación completa, haciendo 4 repeticiones por cada caudal.

Tabla 4. Comparativa de las diferentes biomásas utilizadas en los experimentos y su equivalente en escalados para el modelo 3.

Biomasa [g]	Biomasa por unidad de superficie [Kg m^{-2}]	Biomasa por unidad de volumen [Kg m^{-3}]
90	0.28	1
180	0.56	2
270	0.84	3
360	1.13	4

Una vez realizada la caracterización de los diferentes modelos propuestos, se llevó a cabo un cuarto experimento en el cual se comparó el comportamiento de la biomasa en función de su morfología. Para ello se repitieron los experimentos anteriores para los modelos 1 y 3. Inicialmente la caracterización hidrodinámica se realizó con la especie *Ulva fasciata* que presenta una morfología de individuo completo constituido por un talo ramificado en diferentes lóbulos. Para la realización de este experimento se empleó *Ulva ohnoi*, que presenta una morfología laminar fragmentada con la ausencia de pie.

2.4.2 Cultivo de *Ulva fasciata* en laboratorio

Se realizó un cultivo de *Ulva fasciata* con la finalidad de reproducirla vegetativamente y aumentar su biomasa. Esta biomasa se utilizará para realizar la caracterización hidrodinámica de los diferentes modelos de tanque. Además, de esta manera se puede hacer una primera estimación de la viabilidad del cultivo de *Ulva fasciata* en sistemas de recirculación, ya que es una especie que no ha sido utilizada en sistemas de IMTA. No se realizó un diseño experimental específico debido a que el objetivo principal era conseguir la biomasa para la realización de la caracterización de los tanques.

Esta fase de cultivo tuvo una duración de 10 semanas. Se establecieron condiciones iniciales diferentes para cada una de las semanas, que se pueden observar en la tabla 4, con el objetivo de comprobar y adaptar los requerimientos de esta especie al sistema de cultivo de peces en recirculación del cual se dispone en esta instalación. En la tabla 4, se observa la densidad inicial de cultivo en Kg m^{-2} , los niveles de radiación PAR disponibles en la superficie del tanque en $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y el tanque utilizado para la realización del cultivo, que en todos los casos hace referencia al modelo de tanque 3.

Tabla 4. Relación de las diferentes semanas con la fecha comprendida, los tanques utilizados, la densidad inicial por periodo y la iluminación de la que se dispone.

Semana	Periodo	Tanque	Densidad inicial [Kg m ⁻²]	Iluminación [μmol fotones m ⁻² s ⁻¹]
Semana 1	17/03 - 23/03	R-2	0,43	63
Semana 2	24/03 - 30/03	R-2	0,66	n,d
Semana 3	01/04 - 06/04	R-2	0,82	n,d
Semana 4	07/04 - 13/04	R-2	0,78	n,d
Semana 5	14/04 - 20/04	R-3	1,06	165
Semana 6	21/04 - 27/04	R-3	1,33	165
Semana 7	28/04 - 04/05	R-3	1,43	165
Semana 8	05/05 - 11/05	R-1	0,72	230
		R-3	0,72	165
Semana 9	12/05 - 18/05	R-1	0,99	230
		R-3	0,99	165
Semana 10	19/05 - 25/05	R-1	1,25	230
		R-3	1,25	165

En la semana 1 se realizó un primer periodo de aclimatación con agua de mar.

Durante la semana 2 se decide trasladar el cultivo al exterior ante la sospecha que la radiación de la que se dispone en el interior no es lo suficientemente elevada como para experimentar un notable crecimiento en el alga, ya que como puede observarse en la bibliografía se acostumbra a mantener los cultivos a niveles de radiación superiores a 150 μmol fotones m⁻² s⁻¹ (Pedersen *et al.*, 2009; Altamarino *et al.*, 2003).

Cuando el cultivo se encuentra en la semana 4, en el exterior del laboratorio, se observa la aparición de propágulos en el agua y como los bordes de las láminas de *Ulva* adquieren una tonalidad amarillenta y transparente que indica un proceso de reproducción (Aguilar-Rosas *et al.*, 2005) (Fotografía 3)



Fotografía 3. Reproducción *Ulva fasciata* mediante la liberación de zoosporas.

En la semana 5 del cultivo se decidió trasladar la biomasa al interior del laboratorio dado los datos negativos de crecimiento obtenidos. El alga se encuentra ahora en el tanque de cultivo R-3.

Alcanzada la semana 8 de la fase de cultivo se decide dividir la biomasa en 2 tanques con las mismas características a excepción del foco de luz que proporciona diferentes niveles de radiación PAR, debido a que la densidad alcanzada es muy superior al óptimo estimada en $1,026 \text{ Kg m}^{-3}$ (Neori, 2004) para sistemas de recirculación.

2.4.3. Epifitismo

Se controló regularmente la aparición de epífitos en los cultivos de algas mediante las desinfección de la biomasa y de los tanques. Las desinfecciones se llevaron a cabo cada 7 días durante el control de crecimiento de la biomasa descritos en el apartado 2.4.2.

Se llevaron a cabo procesos de desinfección cada vez que se manipulaba la biomasa, pero únicamente se observó una reducción de la aparición de ésta una vez la densidad de cultivo de la macroalga era lo suficientemente elevada como para inhibir su aparición.

Se tomaron muestras de las colonias presentes en el cultivo y se enviaron al departamento de biología animal, vegetal y economía de la Universidad de A Coruña para llevar a cabo una identificación de las especies presentes por parte del Dr. Javier Cremades.

2.4.4. Determinación de las tasas de crecimiento

Con la finalidad de determinar las tasas de crecimiento de *Ulva fasciata* se llevó a cabo un control del incremento de la biomasa, la eliminación de NO_3 y la eliminación de P del medio de cultivo. Este período se lleva a cabo en un tanque de modelo 3, como el descrito anteriormente, en el cual el alga se mantiene en rotación dentro del tanque mediante un sistema de aireación.

Para realizar un control del crecimiento de la biomasa se llevan a cabo medidas al principio y final de cada período. Al mismo tiempo se calculó el incremento de biomasa por unidad de masa de alga y día mediante el índice %SGR (Specific Growth Rate) utilizando la ecuación (3).

$$\%SGR = \frac{(\ln PF_f - \ln PF_i)}{t} \times 100 \quad \text{ec. 3}$$

Donde: PF_f es el peso fresco del alga al final del período, PF_i es el peso fresco del alga al inicio del período y t es el número de días que dura el período.

También se realizó el cálculo del incremento de biomasa diario por unidad de superficie ecuación (4).

$$\Delta BM = \frac{PF_f - PF_i}{A t} \quad \text{ec. 4}$$

Donde: ΔBM es el incremento de biomasa en $\text{g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ PF_f y PF_i , es el peso fresco del alga al final del período y al inicio en g, A es el área del tanque de cultivo en m^2 y t es el número de días del período.

2.4.5. Eliminación de N- NO_3^-

Se estudió la eliminación de nitrógeno en forma de NO_3^- por parte de las algas en las diferentes condiciones de cultivo propuestas con la finalidad de determinar qué condiciones favorecen una mayor eliminación de nitrato del agua.

Para la determinación de la concentración de nitrato presente en el medio de cultivo se utilizó *Ultraviolet Spectrophotometric Screening Method* descrito en *Standard Methods* (APHA, 1992). Este método se basa en la absorción del ión nitrato a 220 nm en aguas con bajo contenido de materia orgánica y por lo tanto requiere de un espectrofotómetro capaz de realizar lecturas en la zona del ultravioleta.

Podemos dividir este método en cuatro partes: preparación de una recta patrón, preparación de las muestras, lectura de las muestras y cálculos.

Preparación de los patrones

Es necesario llevar a cabo la preparación de una recta patrón mediante la cual seamos capaces determinar la cantidad de NO_3^- con las lecturas que obtendremos de las muestras a analizar. El rango de linealidad del método es hasta 7 mg/L N- NO_3^- y se realizó la calibración con patrones de 0,2; 0,4; 0,8; 1; 2; 4 y 5 mg/L N- NO_3^- . Se preparó, a partir de KNO_3 , una solución madre de 100 mg/L N- NO_3^- y una solución intermedia de 10 mg/L N- NO_3^- . La solución intermedia y los patrones se conservaron congelados. Los patrones se descongelaron para cada determinación y fueron leídos previamente a las muestras en cada uno de los análisis y nos permitieron la determinación de la concentración de éstas.

Preparación de las muestras

Con la finalidad de evitar interferencias en la lectura de las muestras han de seguirse dos pasos: la filtración de éstas y la adición de 1 mL HCl 1M por cada 50 mL de muestra. Una vez se obtuvieron las muestras de los diferentes tanques de cultivo se prosiguió con el filtrado de éstas mediante un filtro de membrana con un diámetro de poro de 0,45 μm . Este filtrado busca reducir el máximo posible el error de las

partículas en suspensión presentes en la muestra puedan realizar a la hora de la lectura (APHA, 1992).

Una vez filtradas se realizaron diluciones de éstas en función de la concentración de nitrato esperada según el nitrato añadido la semana anterior en el tanque de cultivo para asegurarnos que la lectura que obtendríamos entraría dentro del rango de la recta patrón. Las diluciones se llevaron a cabo en un matraz de 50 mL y a continuación se añadió 1 mL de HCl 1M con el objetivo de reducir el error en la lectura que pueden producir los hidróxidos y carbonatos presentes en la muestra (APHA, 1992).

Tanto para la preparación de los patrones como para las muestras se trabajó con agua desionizada.

Lectura de los patrones y las muestras

La lectura de las muestras se realizó en un espectrofotómetro que nos permite leer en dos longitudes de onda distintas (220 nm y 275 nm) simultáneamente. La lectura de 220 nm se lleva a cabo debido a que la luz en esta longitud es absorbida tanto por NO_3 como por la materia orgánica y a 275 nm ya que a esta longitud la luz es absorbida por la materia orgánica pero no por el NO_3^- , cosa que nos permite hacer una corrección del error producido por la materia orgánica restante en la muestra. La corrección propuesta en el método consiste en restar a la absorbancia a 220 nm el sobre de la absorbancia mediada a 275 nm (APHA, 1992).

La lectura de los patrones se realizó de la misma forma y se realizó un blanco con agua desionizada par el ajuste del cero de absorbancia.

Cálculos

Una vez obtuvimos todas las lecturas de patrones y muestras, se llevaron todos los datos a una plantilla de Excel. Primero de todo se aplicó el factor de corrección de la materia orgánica, se restó dos veces la lectura a 275 nm al valor obtenido de la lectura a 220 nm. Seguidamente, se dibujó una recta patrón con la lectura de todos los patrones. Una vez añadida la línea de tendencia se extrajo la ecuación de la recta y la regresión, que nos indicó si es una recta válida. Por último se llevaron los valores obtenidos de las muestras a la ecuación de la recta y se obtuvo la concentración de nitrato expresada como mg por litro de N- NO_3^- en cada una de ellas.

Una vez obtenidos los valores de nitrato presentes en el medio se procedió a la realización de un balance de nitrato y a la determinación de una tasa de eliminación de N- NO_3 del medio mediante la ecuación (5).

$$\text{Eliminación de nitrato} = \frac{(C_{Ni} - C_{Nf}) \times V}{\Delta t} \quad \text{ec. 5}$$

Donde C_{Ni} hace referencia a la concentración inicial de nitrato, C_{Nf} a la concentración de nitrato final, V al volumen del tanque y Δt al periodo de tiempo transcurrido.

2.4.6. Eliminación de P

Se estudió la eliminación de fósforo por parte de las algas en las diferentes condiciones de cultivo propuestas con la finalidad de determinar qué condiciones favorecen una mayor eliminación de fósforo del agua.

Para el análisis de fósforo se empleó una metodología mediante colorimetría con fotómetro modelo 9500-YSI y reactivos de la marca Palintest. Los resultados están siempre referenciados a concentración de fósforo en forma de P.

Una vez obtenidos los valores de fósforo en el medio se realizó un balance del fósforo eliminado durante la semana. Se calculó la tasa de eliminación mediante la ecuación (6).

$$\text{Eliminación de fósforo} = \frac{(C_{Pi} - C_{Pf}) \times V}{\Delta t} \quad \text{ec. 6}$$

Donde: C_{Pi} es la concentración de fósforo inicial, C_{Pf} es la concentración de fósforo final, V es el volumen de medio de cultivo y Δt es el período de tiempo entre mediciones.

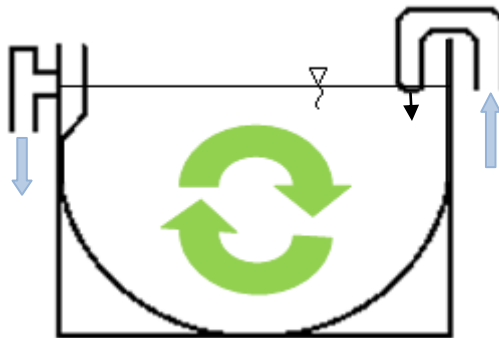
3 Resultados y discusión

3.1. Caracterización hidrodinámica de los diferentes modelos de tanque

A la hora de realizar una valoración del movimiento de las algas en el interior de los diferentes modelos de tanques se prestó especial atención a diferentes puntos importantes: el inicio del movimiento de las algas y en la relación de la velocidad de rotación de las algas con la fuerza de impulsión necesaria para alcanzarla. Además, se realizó una comparación para averiguar qué modelo de tanque es más eficiente a la hora de mantener las algas en movimiento.

3.1.1 Valoración hidrodinámica para el modelo de tanque 1

Para valorar el modelo de tanque 1, se tuvo en cuenta la relación existente entre la velocidad angular de rotación de las algas (ω) y la fuerza de impulsión (F_i) generada por la entrada de diferentes caudales de agua (ec. 1).



Esquema 1. Funcionamiento del modelos de tanque 1.

Se midió la velocidad angular de las algas utilizando diferentes densidades de cultivo. Para ello se partió desde una situación inicial de reposo y se fue incrementando progresivamente el caudal de entrada.

Se observó que hasta no alcanzar un determinado caudal de entrada la masa de algas presente en el tanque no comienza a describir un movimiento rotatorio. Una vez en movimiento, cada pequeño aumento en la fuerza de entrada genera un aumento importante en la velocidad de rotación, cosa que se suaviza ligeramente a medida que la fuerza de entrada aumenta.

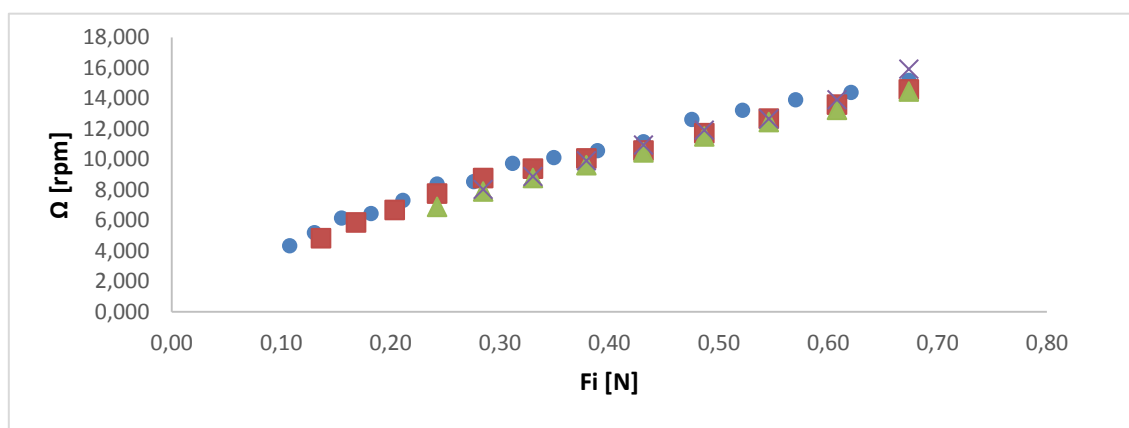


Figura 3. Velocidad de rotación en rpm a diferentes niveles de fuerza de impulso en Newton. Prueba realizada con *Ulva fasciata* con 90 g/tanque ●, 180 g/tanque ■, 270 g/tanque ▲ y 360 g/tanque X.

Tabla 5. Ecuaciones y coeficientes de correlación, obtenidos mediante un ajuste potencial, pertenecientes a la figura 3.

90 g/tanque	$y = 20,176x^{0,6607}$	270 g/tanque	$y = 19,093x^{0,7085}$
	$R^2 = 0,9929$		$R^2 = 0,9988$
180 g/tanque	$y = 19,092x^{0,6614}$	360 g/tanque	$y = 20,691x^{0,7599}$
	$R^2 = 0,9927$		$R^2 = 0,9922$

En la figura 3 se puede observar las velocidades angulares obtenidas con diferentes fuerzas de impulso y con distintas densidades de cultivo. Se realizó un ajuste potencial de la relación establecida entre la fuerza de impulso aplicada y la velocidad angular para cada densidad de cultivo. Como se puede observar en la tabla 5, se aprecia un aumento del exponente de F_i obtenido para las diferentes densidades de cultivo. Cabe señalar que en el trabajo realizado por Flo, 2013, con densidades de cultivo menores y con *Ulva ohnoi*, los exponentes obtenidos era inferiores, próximos a 0,5; lo que coincide con los resultados obtenidos en tanques de agua con rotación horizontal por Oca y Masaló, 2007. Los resultados aquí obtenidos hacen pensar que al aumentar la concentración y el tamaño del alga, el comportamiento mecánico de la mezcla agua-algas va asemejándose cada vez más al comportamiento de una masa sólida en el que cabría esperar que el exponente fuese cercano a 1.

Se observó que es necesario una fuerza de entrada mínima para generar movimiento en las algas, y como se puede apreciar en la figura 4, ésta está relacionada con la concentración de biomasa presente en el tanque. La fuerza de impulso mínima para generar movimiento de las algas aumenta al aumentar la densidad.

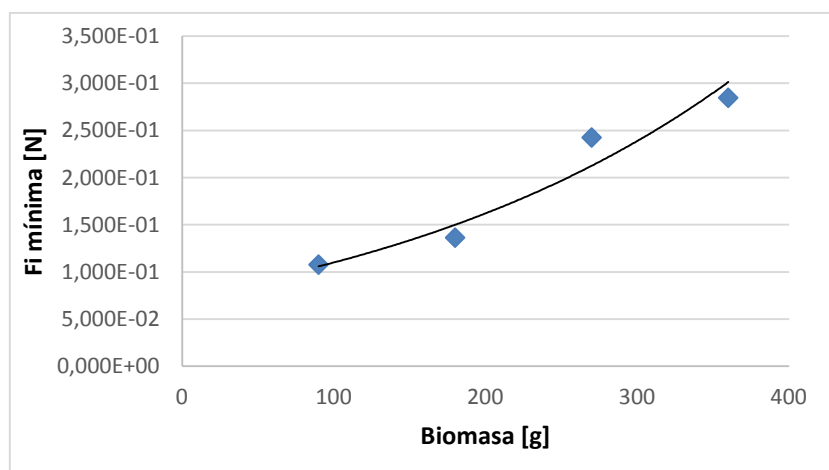


Figura 4. Fuerza de impulso mínima necesaria en Newton para iniciar el movimiento a diferentes concentraciones de biomasa de *Ulva fasciata* en el modelo de tanque 1 (capacidad 40 L).

A pesar de las diferencias observadas en el inicio del movimiento para las diferentes densidades de cultivo, se observa como las diferentes densidades propuestas describen un comportamiento muy similar una vez iniciado el movimiento de rotación.

3.1.2 Valoración hidrodinámica del modelo 2

Para la valoración del modelo de tanque 2, se siguieron los mismos pasos que para el modelo de tanque 1. Se emplearon concentraciones de biomasa diferentes para conseguir densidades de cultivo iguales a las utilizadas en los otros dos modelos presentados, ya que se acerca a la densidad de cultivo óptima.

Cabe destacar que para este modelo de tanque la bomba elegida no fue suficientemente potente para trabajar con las concentraciones de biomasa previstas. Este hecho se observa una vez las algas han entrado en movimiento. Hasta llegar a un caudal de 600 L h^{-1} , el movimiento descrito por las algas está muy desplazado hacia la zona opuesta a la entrada de agua al tanque. Esto provoca que la biomasa, al no distribuirse de manera uniforme en el tanque, no reciba la cantidad de radiación que debería pudiendo reducir así su actividad fotosintética y obteniendo tasas de eliminación de nutrientes y de crecimiento inferiores a las esperadas. El caudal máximo alcanzado fue de 750 L h^{-1} .

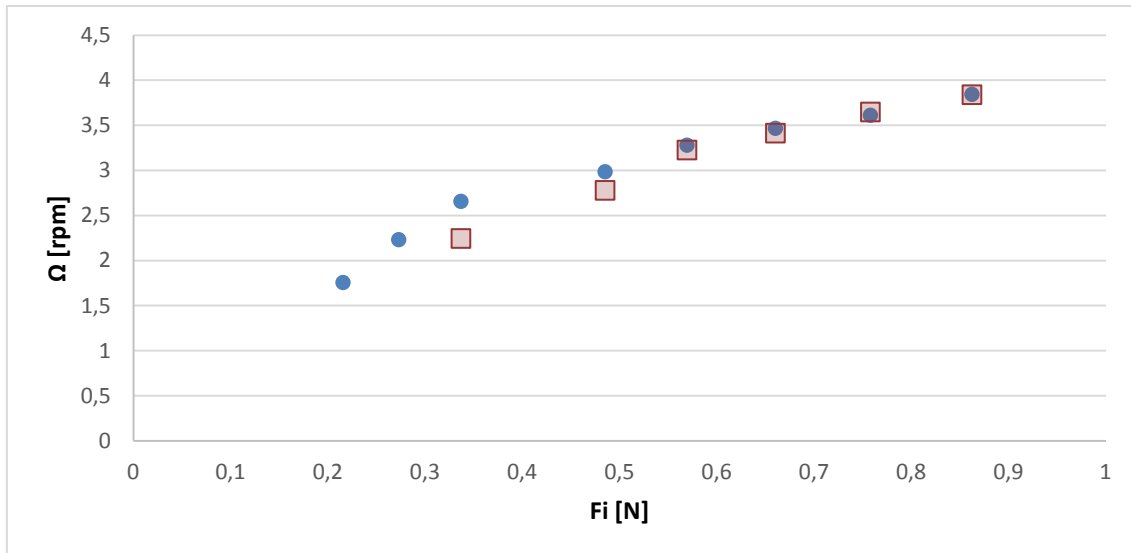


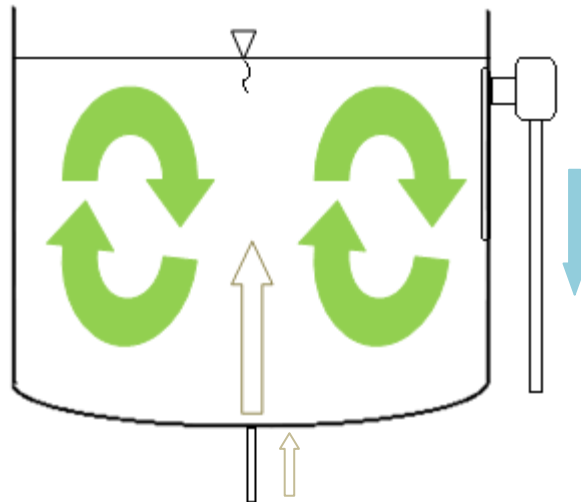
Figura 5. Velocidad de rotación en rpm y a diferentes niveles de fuerza de impulso en Newton. Prueba realizada con *Ulva ohnoi* con 360 g/tanque ● y 720 g/tanque ■.

Como se observa en la figura 5, este sistema también presenta diferencias en los requerimientos mínimos necesarios de fuerza de impulso para elevar y mantener en movimiento las diferentes densidades de cultivo. Parece ser que el caudal de entrada hasta los 600 L h⁻¹ no es capaz de contrarrestar el gradiente generado en el desagüe del tanque y las algas se ven desplazadas hacia la salida de agua, hasta que la fuerza de entrada no es lo suficientemente elevada como para distribuir las uniformemente en el tanque. Este fenómeno deja de ser visible para caudales superiores a 600 L h⁻¹ en las diferentes densidades de cultivo estudiadas. Además podemos apreciar como las diferentes concentraciones de biomasa describen una evolución de la velocidad de rotación prácticamente idéntica una vez alcanzado el caudal de entrada mencionado.

De los dos apartados anteriores (3.1.1 y 3.1.2), deducimos que en este tipo de tanque la densidad de cultivo tiene poca influencia en la velocidad de rotación, pero en cambio sí que afecta de manera importante a la fuerza de impulso necesaria para iniciar el movimiento. Además, sería interesante analizar la influencia de la velocidad de rotación en la homogeneidad de la distribución de la biomasa.

3.1.3. Valoración hidrodinámica del modelo 3

Para realizar la valoración hidrodinámica del modelo 3, se estudió la potencia necesaria para alcanzar las diferentes velocidades de rotación de la biomasa, ya que no era posible realizar el cálculo de la fuerza de impulso para cada caudal de aire debido a que intervienen variables que no era posible determinar.



Esquema 2. Funcionamiento del modelo de tanque 3.

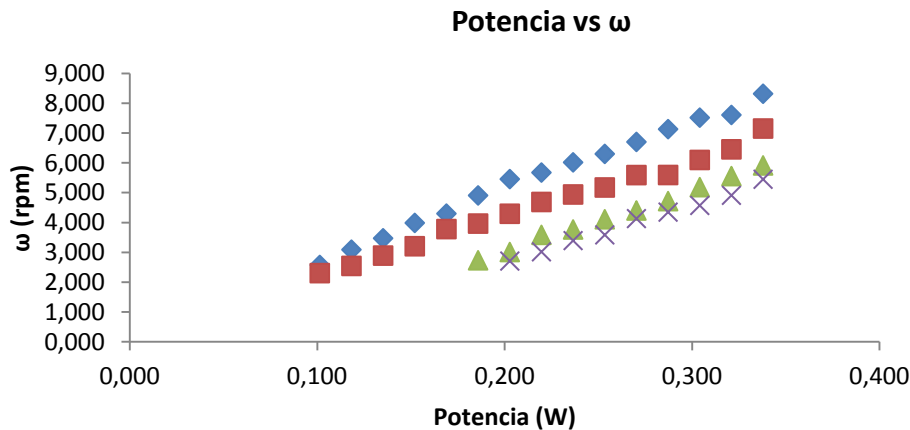


Figura 6. Velocidad angular en rpm a diferentes potencias en W para diferentes concentraciones de biomasa. Experimento realizado con *Ulva fasciata* a concentraciones de 90 g/tanque \blacklozenge , 180 g/tanque \blacksquare , 270 g/tanque \blacktriangle y 360 g/tanque \times .

Como muestra la figura 6, para este modelo de tanque existe una diferencia notable en la velocidad de rotación que se alcanzó con las diferentes concentraciones de biomasa empleadas, apreciándose una relación inversa entre la concentración de biomasa y la velocidad de rotación alcanzada para una misma potencia, siendo la concentración más baja la que adquirió velocidades de rotación más elevada y la concentración más elevada.

En referencia a la potencia mínima necesaria para elevar y mantener las algas en rotación se ha establecido una relación entre la biomasa y la potencia mínima necesaria que se puede observar en la figura 7, donde se aprecia como para mayor concentración de biomasa, mayor es la potencia de aireación necesaria. Se observó que, para las concentraciones más bajas (90 y 180 g/tanque), se requiere una misma potencia. Este fenómeno es debido a la morfología que presenta el alga de individuo

completo y a la geometría ligeramente cóncava del fondo del tanque que provoca que la biomasa se acumule en un sólo punto. De esta manera se favorece que los diferentes individuos queden entrelazados y hasta que no se alcanza una potencia mínima no consiguen liberarse y empezar una ascensión hacia la superficie.

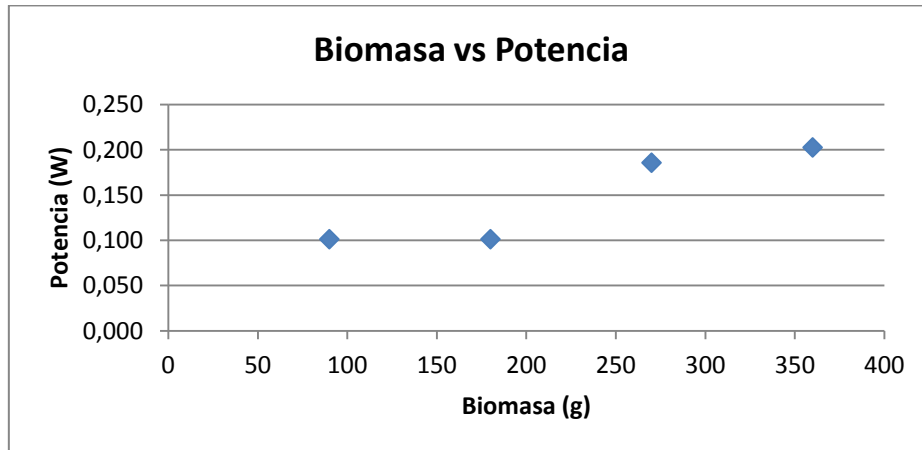


Figura 7. Potencia mínima necesaria en W para iniciar el movimiento a diferentes concentraciones de biomasa de *Ulva fasciata* en el modelo de tanque 3.

3.3 Comparación del sistema de aireación con el sistema de fuerza de impulso de la entrada de agua.

Finalmente se realizó una comparación de los requerimientos energéticos para ambos modelos, 1 y 3. Para ello se calculó la altura media a la que trabajan los dos modelos y se procedió al cálculo de la potencia necesaria para ejercer la fuerza de impulso necesaria para los diferentes regímenes de caudales empleados en el estudio de la caracterización hidrodinámica.

En el modelo de tanque 1 fue necesario calcular la altura de trabajo mediante la ecuación 7.

$$H = \frac{v^2}{2g} \quad \text{ec. 7}$$

Donde: H es la altura, V es la velocidad de salida del agua y g es la fuerza de la gravedad.

Para el modelo 3 la altura fue de 0,31 m para todos los caudales estudiados debido a su diseño.

Una vez calculada la altura se calculó la potencia necesaria para ejercer las diferentes fuerzas de impulso con las que se ha trabajado durante la caracterización de los diferentes modelos empleando la siguiente ecuación:

$$P = V H A 9810 \quad \text{ec. 8}$$

Donde: P es la potencia, V es la velocidad de salida, A es el área de salida.

Se realizó una comparación de la potencia necesaria para elevar y mantener las mismas densidades en los diferentes modelos de tanque. En la figura 8, se observa como el modelo de tanque 1 presenta unos requerimientos de potencia más elevados pero también consigue unas velocidades de rotación superiores que el modelo 3. Se sospecha que este fenómeno es debido a que en el modelo de tanque 3 presenta una capacidad, 90 L, que es prácticamente el doble que la presentada por el modelo de tanque 1, 40 L, cosa que provoca que la biomasa adquiera una velocidad de rotación inferior en el modelo de tanque 3.

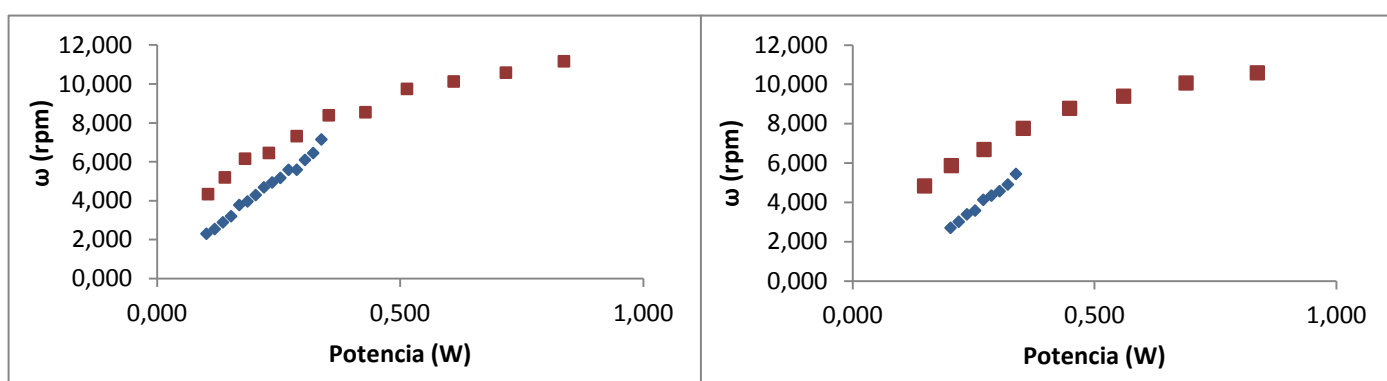


Figura 8. Comparativa de los requerimientos energéticos entre los modelos 1 y 3. Modelo 3 \blacklozenge y modelo 1 \blacksquare

3.3 Comparación del comportamiento de la biomasa en función de la morfología

Para este estudio, se realizaron nuevas caracterizaciones de dos de los tanques utilizando *Ulva ohnoi*, de morfología distinta a *Ulva fasciata*, que se compararon con los resultados obtenidos previamente con *Ulva fasciata*. *Ulva fasciata* presenta una morfología de individuo completo en la cual se encuentra presente un talo central que se divide en diferentes lóbulos, y *Ulva ohnoi*, que se encuentra fraccionada en pequeños trozos laminares con ausencia de talo central.

Se estudió el comportamiento de las dos morfologías para los modelos de tanque 1 y 3, que presentan dos sistemas de impulsión diferentes (impulso del agua de entrada para el modelo 1 y aireación en el modelo 3).

3.3.1 Modelo 1

Siguiendo el mismo patrón que el realizado para la caracterización del modelo 1 con *Ulva fasciata*, se llevó a cabo un estudio del comportamiento de *Ulva ohnoi*

utilizando las mismas concentraciones de biomasa y los mismos regímenes de caudales para poder realizar una comparación con el comportamiento de *Ulva fasciata*.

Como se puede observar en la figura 9, el patrón de comportamiento de *Ulva ohnoi* es muy similar para las diferentes concentraciones de biomasa utilizadas. Como en los casos anteriores, se aprecia una diferencia en los requerimientos de fuerza de entrada necesaria para elevar y mantener en un movimiento de rotación las diferentes concentraciones de biomasa.

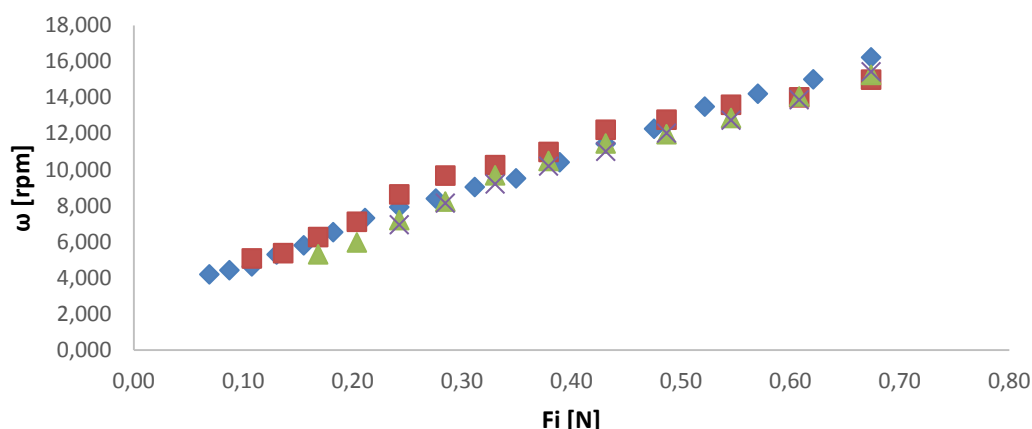


Figura 9. Velocidad de rotación en rpm a diferentes fuerzas de impulso en Newton para diferentes concentraciones de biomasa. Experimento realizado con *Ulva ohnoi* a concentraciones de 90 g/tanque \blacklozenge , 180 g/tanque \blacksquare , 270 g/tanque \blacktriangle y 360 g/tanque \times .

Al igual que para el estudio del comportamiento de *Ulva fasciata*, se ha realizado un ajuste potencial de la relación establecida entre la velocidad de rotación de la biomasa y la fuerza de impulso necesaria para alcanzarla. Como se observa en la figura 8, a medida que aumentamos la biomasa se aumenta el exponente del término independiente, cosa que indica que, cuanto más concentración de biomasa, ésta adquiere un comportamiento más semejante al de un sólido dentro del tanque.

Tabla 7. Ecuaciones y coeficientes de correlación, obtenidos mediante el un ajuste potencial, correspondientes a la figura 8.

90 g/tanque	$y = 19,401x^{0,6216}$	270 g/tanque	$y = 20,998x^{0,7593}$
	$R^2 = 0,9871$		$R^2 = 0,9893$
180 g/tanque	$y = 19,961x^{0,6275}$	360 g/tanque	$y = 20,384x^{0,7373}$
	$R^2 = 0,988$		$R^2 = 0,9941$

En la tabla 7, se aprecia un aumento en el exponente de Fi, al igual que en el caso de *Ulva fasciata*, a medida que se aumenta la fuerza de impulso. Se deduce que esta tendencia se rompe en la densidad de 270 g/tanque debido, probablemente, a algún incidente en la fase experimental.

En la figura 10 se puede apreciar la relación existente entre la concentración de biomasa utilizada y la fuerza de entrada mínima necesaria para elevar y mantener en movimiento *Ulva ohnoi*. La fuerza de impulso necesaria se fue incrementando a medida que se incrementó la densidad de cultivo.

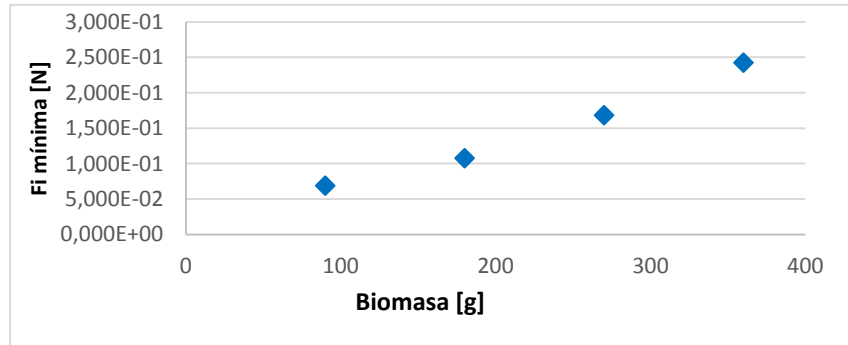


Figura 10. Fuerza de impulso mínima necesaria en Newton para iniciar el movimiento a diferentes concentraciones de biomasa de *Ulva ohnoi* en el modelo de tanque 1.

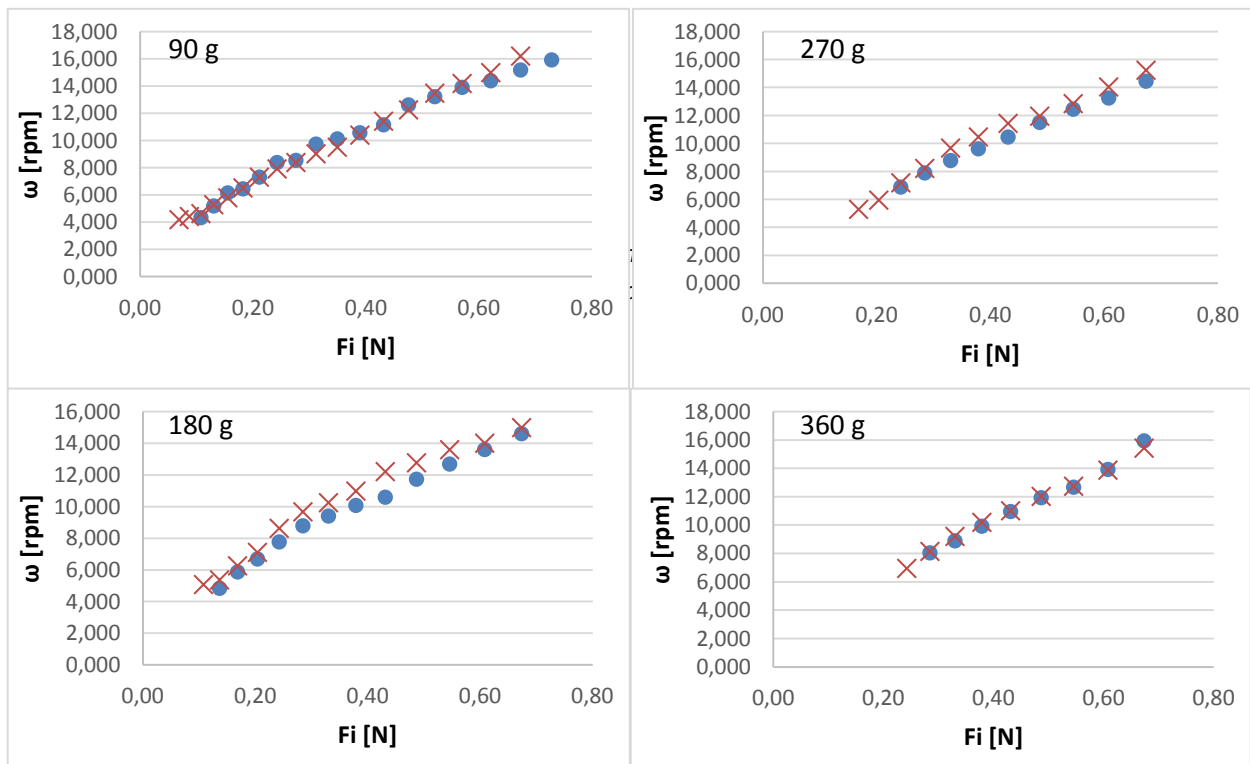


Figura 11. Comparativa de las dos morfologías estudiadas para el modelo de tanque 1. Estudio realizado con *Ulva fasciata* \blacklozenge y *Ulva ohnoi* \times .

Para realizar la comparación del comportamiento de las dos morfologías estudiadas, se realizó un ajuste potencial y se compararon los diferentes exponentes

obtenidos. Como podemos observar en la tabla 8, los coeficientes y ecuaciones obtenidos son prácticamente idénticos, hecho también observable en la representación del comportamiento de la biomasa a diferentes densidades y morfologías en la figura 11. A pesar de haber obtenido resultados muy similares (tabla 6), cualitativamente podemos observar como la biomasa de *Ulva ohnoi* se distribuye de una manera mucho más uniforme por todo el tanque, aprovechando así toda la radiación disponible que llega a la superficie de éste. En cambio, *Ulva fasciata* tiende a agruparse debido a que su morfología favorece que los diferentes individuos se entrelacen impidiendo así el aprovechamiento de la radiación de la que disponen en la superficie.

Tabla 8. Relación entre la concentración de biomasa por tanque y las ecuaciones y correlaciones obtenidos.

90 g/tanque	Ohnoi	$y = 19,401x^{0,6216}$	270 g/tanque	Ohnoi	$y = 20,998x^{0,7593}$
		$R^2 = 0,9871$			$R^2 = 0,9893$
	Fasciata	$y = 20,056x^{0,6568}$		Fasciata	$y = 19,093x^{0,7085}$
		$R^2 = 0,9935$			$R^2 = 0,9988$
180 g/tanque	Ohnoi	$y = 19,961x^{0,6275}$	360 g/tanque	Ohnoi	$y = 20,384x^{0,7373}$
		$R^2 = 0,988$			$R^2 = 0,9941$
	Fasciata	$y = 19,092x^{0,6614}$		Fasciata	$y = 20,691x^{0,7599}$
		$R^2 = 0,9927$			$R^2 = 0,9922$

En la figura 12, se puede apreciar una diferencia en los requerimientos de fuerza de impulso mínimo para elevar y mantener la biomasa en rotación para las diferentes morfologías. *Ulva ohnoi* presenta unos requerimientos inferiores a *Ulva fasciata*.

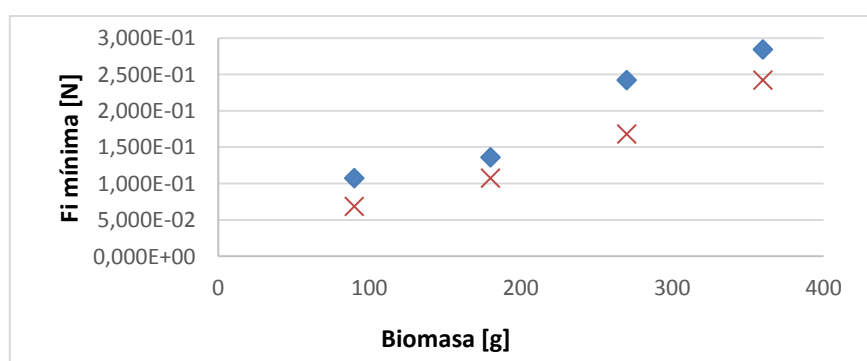


Figura 12. Comparativa de la fuerza de impulso mínima necesaria en Newton para iniciar el movimiento a diferentes concentraciones de biomasa en el modelo de tanque 1. *Ulva fasciata* ◆. *Ulva ohnoi* X.

3.3.2 Modelo 3

Para realizar la comparación entre el comportamiento que describen los dos tipos de morfología estudiados en el modelo de tanque 3, se siguió el mismo procedimiento que en la valoración hidrodinámica de éste empleando para ello *Ulva ohnoi*.

Como puede observarse en la figura 13, para este modelo y esta morfología también se aprecian diferencias en los requerimientos mínimos de potencia para elevar y mantener en rotación las diferentes concentraciones de biomasa estudiadas. También podemos observar cómo se establece una relación inversa entre la biomasa y la velocidad de rotación alcanzada, obteniendo velocidades de rotación superiores para la concentración de biomasa más baja. Sin embargo, para este modelo que funciona con aireación, podemos apreciar que la biomasa, llegado un umbral determinado, empieza a experimentar un descenso del aumento de la velocidad respecto al aumento del caudal de aire. Esto parece indicar que llegado a un determinado caudal de aire la biomasa alcanza una velocidad máxima. Además, cabe destacar que alcanzado un caudal superior a 300 L h⁻¹ algunos individuos empiezan a flotar y se acumulan a lo largo del perímetro del tanque. Esto es debido a la turbulencia que genera la aireación en la superficie y que favorece la acumulación de aire bajo algunos individuos de *Ulva ohnoi*.

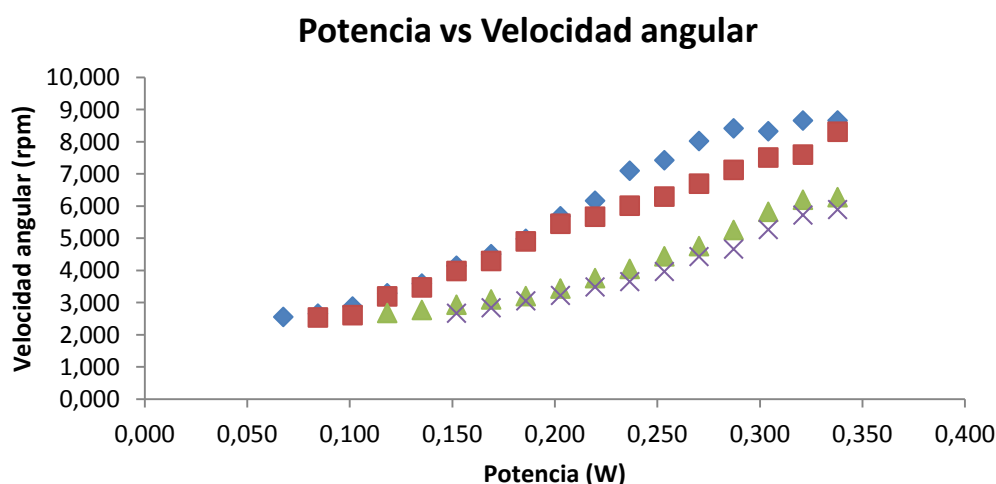


Figura 13. Velocidad de rotación en rpm a diferentes fuerzas de impulso en Newton para diferentes concentraciones de biomasa. Experimento realizado con *Ulva ohnoi* a concentraciones de 90 g/tanque ◆, 180 g/tanque ■, 270 g/tanque ▲ y 360 g/tanque X.

Se realizó un ajuste potencial que corrobora lo observado gráficamente con las ecuaciones y correlaciones correspondientes en la tabla 9.

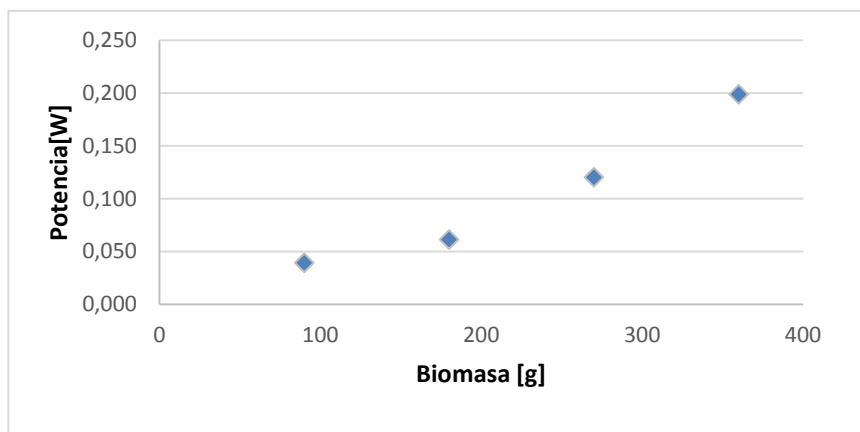


Figura 14. Potencia mínima necesaria en W para iniciar el movimiento a diferentes concentraciones de biomasa de *Ulva ohnoi* en el modelo de tanque 3.

En referencia a los requerimientos mínimos de potencia para elevar y mantener la biomasa en rotación, podemos observar que se establece una relación entre la concentración de biomasa y los requerimientos mínimos de potencia que se puede observar en la figura 14. Esta muestra como para densidades más bajas los requerimientos son inferiores y se incrementan a medida que aumentamos la concentración de biomasa.

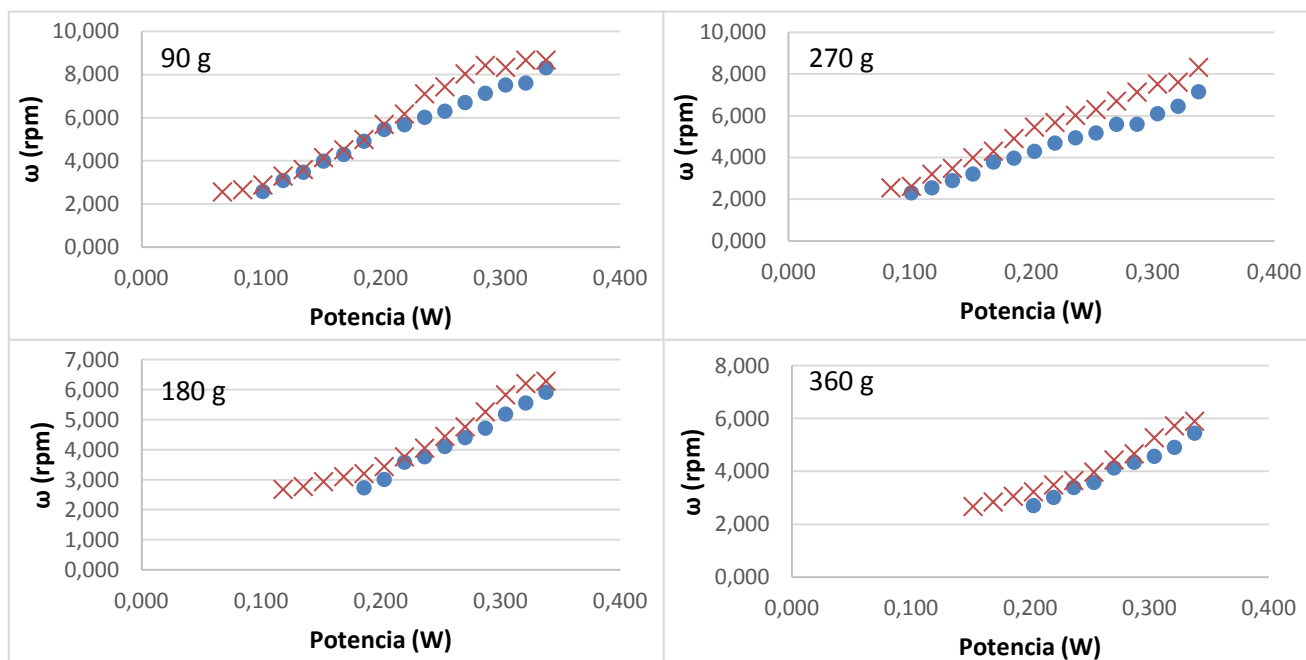


Figura 15. Comparativa de las dos morfologías estudiadas para el modelo de tanque 3. Estudio realizado con *Ulva fasciata* ♦ y *Ulva ohnoi* X.

Tabla 9. Relación entre la concentración de biomasa por tanque y las ecuaciones y correlaciones obtenidas para cada una de las morfologías.

90 g/tanque	Ohnoi	$y = 24,04x^{0,8979}$	270 g/tanque	Ohnoi	$y = 15,459x^{0,8817}$
		$R^2 = 0,9717$			$R^2 = 0,9432$
	Fasciata	$y = 23,225x^{0,9433}$		Fasciata	$y = 23,487x^{1,2715}$
		$R^2 = 0,9949$			$R^2 = 0,994$
180 g/tanque	Ohnoi	$y = 21,743x^{0,8964}$	360 g/tanque	Ohnoi	$y = 17,315x^{1,0299}$
		$R^2 = 0,9928$			$R^2 = 0,9691$
	Fasciata	$y = 18,476x^{0,9174}$		Fasciata	$y = 22,58x^{1,3245}$
		$R^2 = 0,9943$			$R^2 = 0,9929$

Finalmente, para llevar a cabo la comparación del comportamiento de las diferentes morfologías presentadas en el modelo de tanque 3, se utilizaron los datos obtenidos en la caracterización de dicho modelo con *Ulva fasciata* y *Ulva Ohnoi*.

Como puede apreciarse en la figura 15, existen diferencias en las velocidades alcanzadas para las diferentes morfologías estudiadas en el modelo de tanque 3. Se puede observar como para todas las densidades estudiadas, *Ulva ohnoi* alcanza unas velocidades de rotación superiores a *Ulva fasciata*, aunque esta diferencia no es excesivamente notoria. A pesar de ello, cabe destacar que para este sistema de agitación, *Ulva ohnoi* se distribuye de manera uniforme por todo el tanque. En cambio *Ulva fasciata* presenta el mismo comportamiento que en los demás modelo y algunos individuos se entrelazan entorpeciendo el movimiento e impidiendo la captación de radiación de manera adecuada.

En la figura 16, podemos observar los requerimientos de potencia necesarios para elevar y mantener en rotación las diferentes densidades de cultivo, donde *Ulva ohnoi*, debido a su morfología, presenta un requerimientos inferiores para todos los casos.

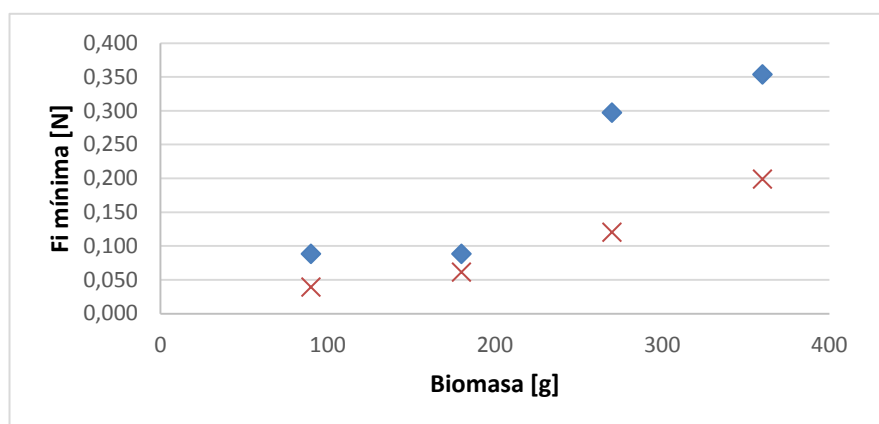


Figura 16. Comparativa de la fuerza de impulso mínima necesaria en Newton para iniciar el movimiento a diferentes concentraciones de biomasa en el modelo de tanque 3. *Ulva fasciata* ◆. *Ulva ohnoi* X.

3.4 Crecimiento

Se realizó un estudio del crecimiento de *Ulva fasciata* durante un periodo de 10 semanas comprendido entre el 17/03/2015 y 25/05/2015. Semanalmente se variaron las condiciones de cultivo, aumentando progresivamente la concentración de N- NO_3^- buscando adaptar el cultivo de algas a las condiciones presentes en el cultivo de peces que se estableció en una media de 90 mg N- $\text{NO}_3^- \text{L}^{-1}$.

Las semanas 1 y 2 el tanque permaneció con 10 mg $\text{NO}_3^- \text{L}^{-1}$ debido a que el alga acaba de llegar al laboratorio. Se elevó la concentración de nitrato a 20 mg $\text{NO}_3^- \text{L}^{-1}$ de la semana 3 a las 7. Finalmente se aumentó la concentración inicial de nitrato a 30 mg $\text{NO}_3^- \text{L}^{-1}$.

Durante la semana 1 el tanque dispuso de unos niveles de radiación PAR de 63 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$. De mediados de la semana 2 a la semana 4 el tanque se mantuvo en el exterior del laboratorio ante la sospecha de falta de intensidad lumínica. En la semana 5 se introdujo de nuevo en el interior del laboratorio proporcionándole unos niveles de radiación PAR de 125 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Llegados a la semana 7, se dividió la biomasa en dos tanques para reducir la densidad de cultivo. Uno de los tanques se mantuvo a 125 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de radiación PAR y en el otro se instaló un foco que proporcionaba unos niveles de radiación PAR de 230 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

En la semana 3 y durante la semana 4 se observó la aparición de fitoplancton en el interior del tanque de cultivo, proporcionándole una tonalidad amarillenta al medio de cultivo. Además, se observó la aparición de organismos epífitos adheridos a la biomasa.

Las gráficas siguientes ilustran la evolución de los parámetros SGR, ΔBM , densidad de cultivo y concentración inicial de NO_3^- :

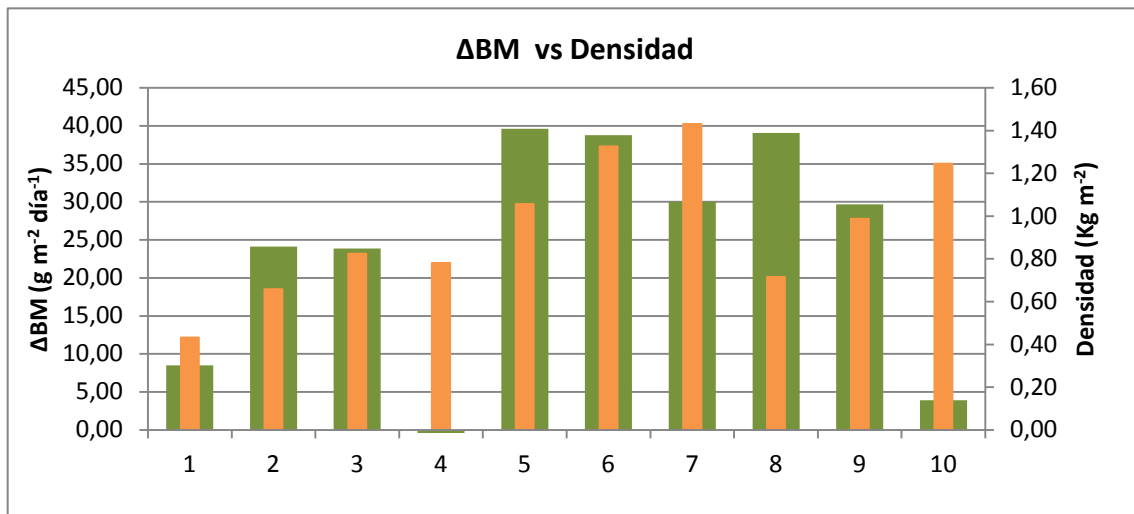


Figura 17. Comparativa entre la densidad en el tanque de cultivo ■ y el incremento de la biomasa en $\text{g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ■

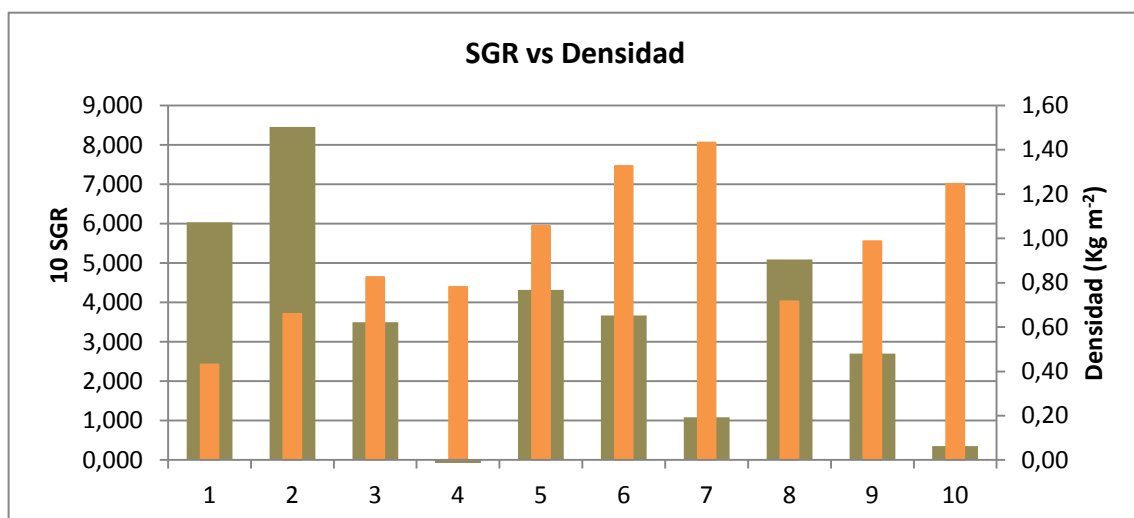


Figura 18. Comparativa entre la densidad en el tanque de cultivo ■ y el parámetro SGR ■.

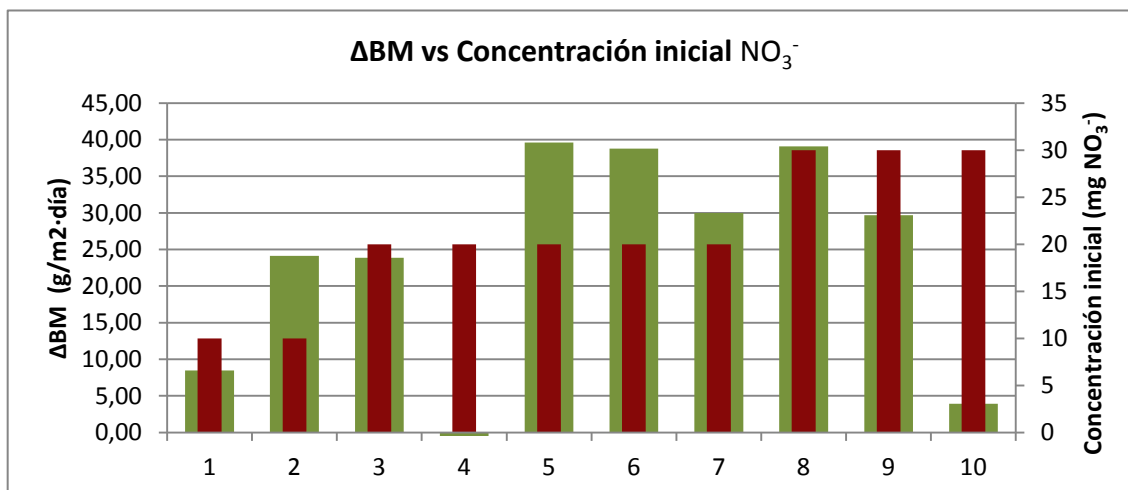


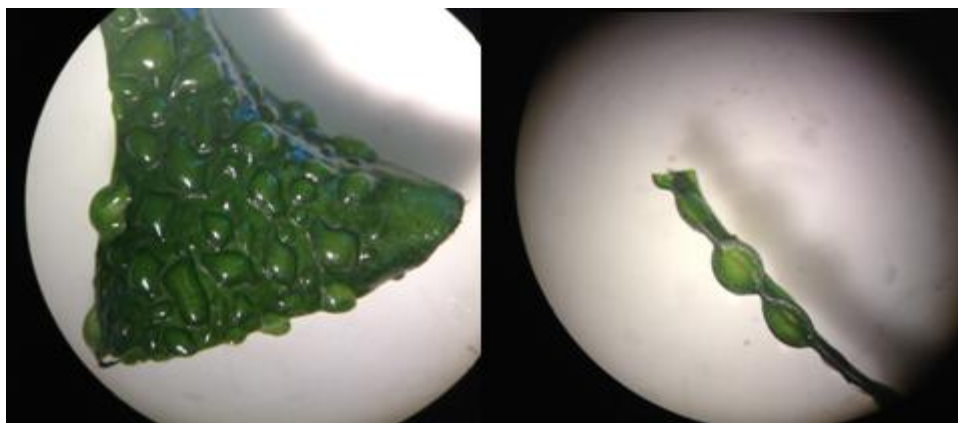
Figura 19. Comparativa entre el incremento de biomasa en $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y la concentración inicial de N-NO_3^- en mg L^{-1} .

En la figura 17, podemos apreciar un incremento paulatino de la ΔBM hasta alcanzar la semana 6 y 7. Se sospecha que este descenso en el ΔBM es debido a que durante este periodo la densidad también se ha ido incrementando. Llegados a la semana 5, se supera el valor de 1 Kg m^{-2} en la densidad de cultivo, estimado como valor óptimo para *Ulva lactuca*, del mismo género que *Ulva fasciata* (Neori *et al*, 1991). Este aumento de la densidad, provoca un sombreado sobre la biomasa que disminuye su actividad fotosintética y su ΔBM .

Además, como se puede apreciar en la figura 18, a medida que se incrementa la densidad de cultivo, disminuye el índice SGR, hecho que se puede apreciar claramente desde la semana 5 a la 7, y desde la semana 8 a la 10. Se consiguió un índice SGR más elevado para las densidades de cultivo mínimas coincidiendo con Khoi *et al* (2011).

En referencia a la concentración inicial de NO_3^- , se puede apreciar como al aumentar este parámetro parece observarse un incremento en el ΔBM , debido al aumento de la densidad que favorece una mayor tasa de eliminación de nutrientes, como muestra la figura 19.

No obstante, cabe destacar dos fenómenos importantes: durante la semana 3 y 4 se observó una disminución drástica del índice SGR y del ΔBM , hecho que puede atribuirse a las pronunciadas fluctuaciones de temperatura que se observaron en el exterior del laboratorio; y el descenso del ΔBM y el índice SGR observado a partir de la semana 8 y que, aunque no se muestre en la figura, siguió en descenso a partir de la semana 10, debido a un bloqueo de la biomasa. Este bloqueo se manifiesta en la morfología del alga, como se puede observar en la fotografía 4, con el endurecimiento y la aparición de rugosidad sobre la superficie del alga.



Fotografía 4. Individuo bloqueado de *Ulva fasciata*

Cabe la posibilidad de que este bloqueo venga provocado por la escasa renovación de agua en los tanques. Este hecho, junto al aumento de la densidad de cultivo, aumentaba el consumo de CO₂ de las algas durante el día, con el consiguiente aumento de pH, que llegó a sobrepasar los 10 puntos.

Sería interesante modificar el sistema de alimentación de agua de los tanques procurando que el ascenso del pH no sea tan pronunciado; para ello, se podrían alimentar con agua proveniente del sistema de cultivo de peces durante el día, con un nivel de CO₂ muy superior y un pH mucho más bajo.

3.5. Epifitismo.

Se ha observado para diferentes especies de *Ulva* una asociación simbiótica con diferentes especies de bacterias que favorecen la reproducción, el crecimiento y la formación de talo, y que además están asociadas a la morfología que ésta acaba presentando en su estado más maduro. Este hecho se produce sobretodo en especies con presencia de talo, dónde estas colonias o films se establecen y dependiendo de su extensión favorecen una u otra morfología del alga. Esta asociación se debe a la conexión que presentan estas bacterias entre sí y con el género *Ulva*, el único donde se ha observado esta simbiosis, que acaba estimulando la actividad de las células madre presentes en ésta e induciendo a la formación de talo. Todavía se desconoce la necesidad de la simbiosis existente entre las diferentes especies que la forman, pero se ha podido comprobar, mediante diferentes cultivos en medio esterilizado, como la ausencia de esta simbiosis provoca malformaciones en diferentes especies de *Ulva* (Wichard *et al.*, 2015).

Durante la realización del fase de cultivo para *Ulva fasciata* se observó la aparición de diferentes cianobacterias, algas epífitas, fitoplancton y otros microorganismos. Se lograron identificar algunas de las especies presentes en el medio de cultivo.

Se observó la aparición de *Spirulina spp.* una cianobacteria, fotosintética, filamentosa, de forma helicoidal y multicelular.

Se observó la aparición de ésta en forma de film con la presencia de otros microorganismos en los tanques de cultivo que se conservaban con *Ulva ohnoi* de un proyecto anterior. *Ulva ohnoi* se encontraba en un tanque de cultivo con un compresor de aire que mantenía en suspensión la biomasa y facilitaba la agitación del medio de cultivo en septiembre de 2014, con una elevada temperatura cosa que, junto al sustrato que proporcionaba dicha biomasa favorece el crecimiento de esta cianobacteria (López *et al.*, 2010, Ogbonda *et al.*, 2007).

Se identificó también una cianofícea del género *Leptolyngbya*. Esta cianobacteria está formada por tricomas rosados de células cuadradas o rectangulares de 1,5-2 micras de diámetro, de vainas difluentes y célula apical ni capitada ni atenuada. Hay unas 80 especies descritas, muchas extremófilas, es difícil saber qué especie es, únicamente se puede identificar mediante secuenciación genética.

Además también se pudo ver la aparición de copépodos en el medio de cultivo y algunas diatomeas.

3.6. Eliminación de N-NO_3^- .

Se realizó el seguimiento de la eliminación de N-NO_3^- del medio durante las 10 semanas que duró el experimento.

Las gráficas siguientes ilustra la evolución de los parámetros ΔBM , N-Uptake, concentración inicial de NO_3^- y densidad de cultivo:

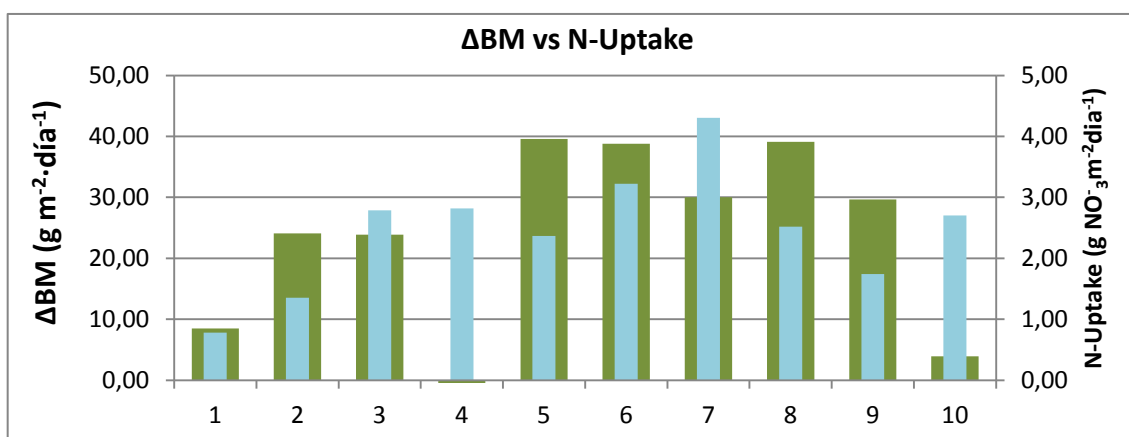


Figura 20. Comparativa del incremento de biomasa en $\text{g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y el parámetro N-Uptake en $\text{g NO}_3^- \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ durante las diferentes semanas que comprende el experimento.

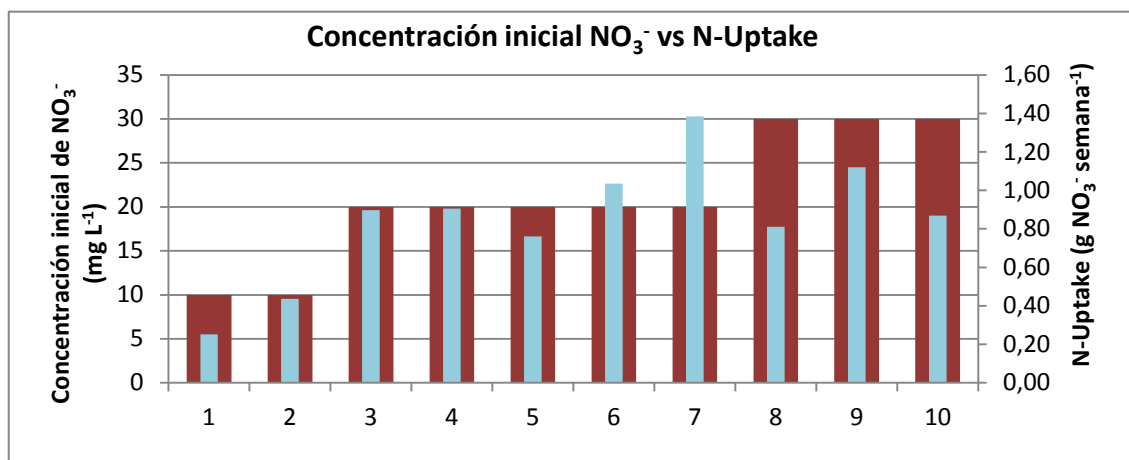


Figura 21. Relación la concentración inicial de NO₃⁻ y la tasa de eliminación de N-NO₃⁻ en g NO₃⁻ semana⁻¹.

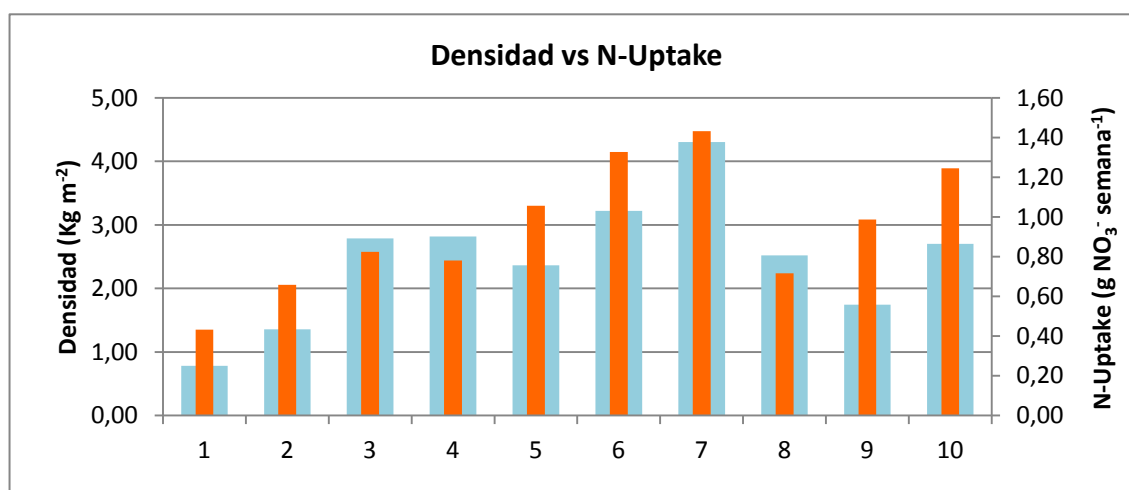


Figura 22. Relación entre la tasa de eliminación de NO₃⁻ en g NO₃⁻ m⁻² semana⁻¹ y la densidad de cultivo en Kg m⁻².

Se obtuvieron diferentes tasas de eliminación de nitrógeno del medio que concuerdan con las tasas de crecimiento observadas en el apartado anterior. Como se puede observar en la figura 20, las tasas de eliminación de nitrógeno presentan una clara relación con el crecimiento experimentado por la biomasa. Además, se observa esta misma relación para los dos parámetros estudiados también en este apartado: concentración inicial de NO₃⁻ (figura 21) y densidad de cultivo (figura 22).

Se observa para todos los casos una disminución de la tasa de eliminación de nitrógeno a partir de la semana 8, hecho que podemos justificar con el bloque sufrido por el alga, comentado en el apartado de crecimiento.

Cabe destacar el valor obtenido para la semana 4, donde no se observa crecimiento pero se aprecia una clara eliminación de nitrógeno. Este hecho puede deberse a la aparición de fitoplancton que se observó durante la semana 3 y 4.

3.5 Eliminación de fósforo.

Al igual que se hizo con la eliminación de $N-NO_3^-$, se realizó un seguimiento de eliminación de P a lo largo de las 10 semana que duró el experimento.

Las siguientes gráficas muestran la evolución de la eliminación de fósforo, ΔBM , densidad de cultivo y eliminación de nitrógeno:

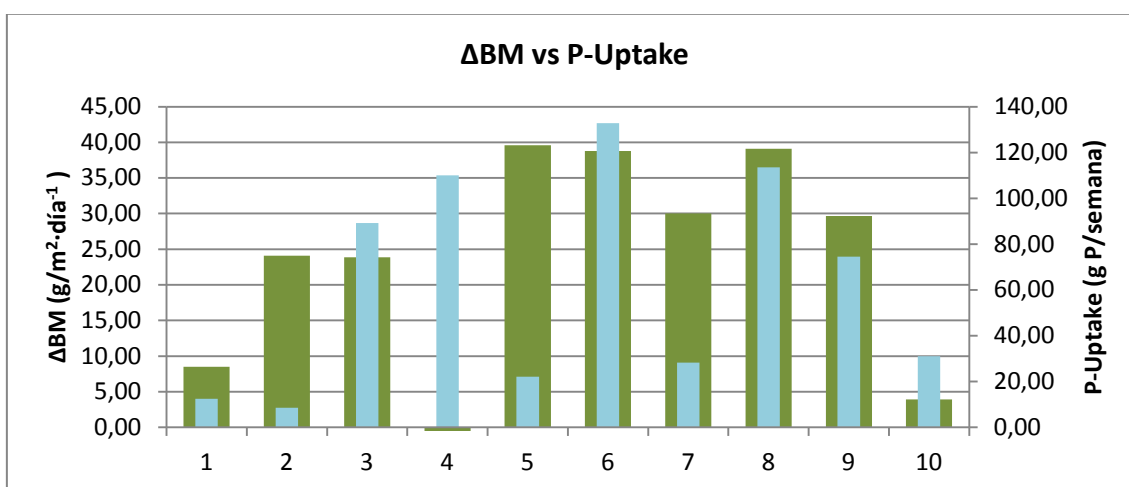


Figura 23. Relación entre la tasa de eliminación de fósforo en $mg\ m^{-2}\ día^{-1}$ y el incremento de biomasa en $g\ m^{-2}\ día^{-1}$.

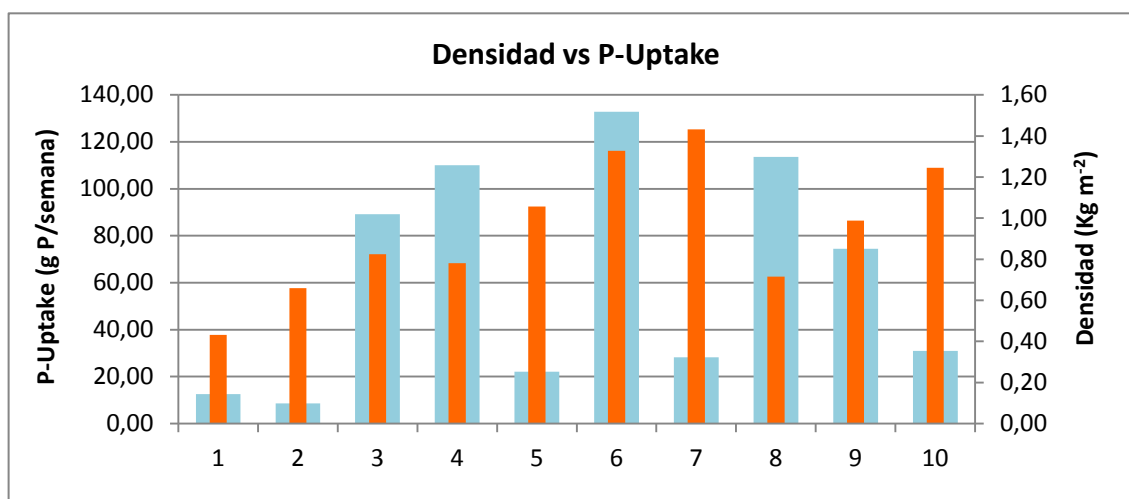


Figura 24. Relación entre la tasa de eliminación de fósforo en $mg\ P\ semana^{-1}$ y la densidad de cultivo en $Kg\ m^{-2}$.

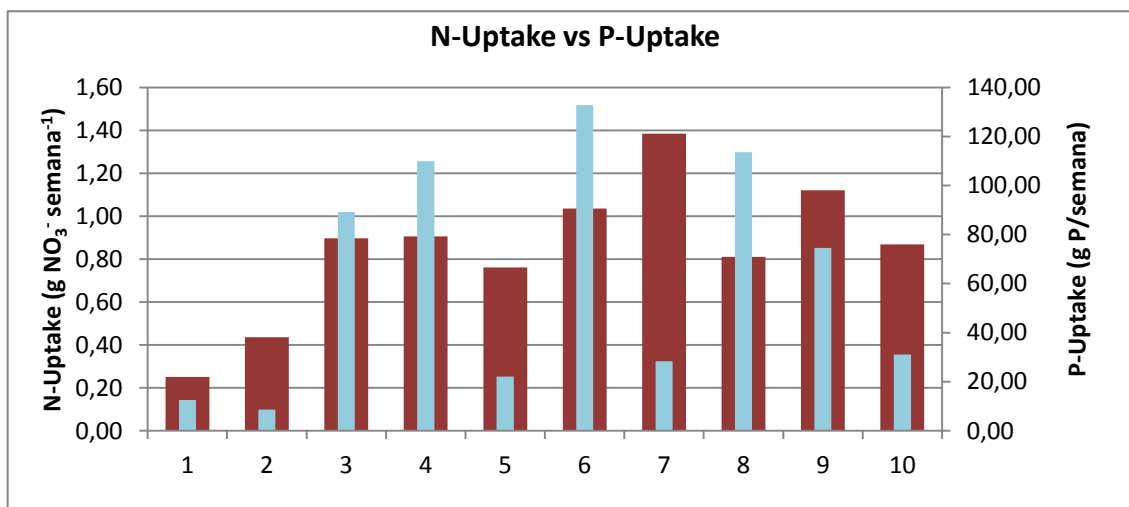


Figura 25. Relación entre la eliminación de N-NO_3^- en $\text{g NO}_3^- \text{ semana}^{-1}$ ■ y la tasa de eliminación de fósforo ■

No se observó relación entre la eliminación de fósforo y ninguno de los demás parámetros estudiados. Según varios autores, existe una relación entre la eliminación de fósforo, la eliminación de nitrógeno y la eliminación de carbono del medio de cultivo por parte de las algas. Como se puede observar en las figuras 23, 24 y 25, esta relación es inexistente durante esta fase de cultivo. Cabe destacar que este hecho puede ser debido a que se sospecha de la fiabilidad del método empleado para el análisis de fósforo, ya que posteriormente a este cultivo se observó discordancias entre algunos valores obtenidos durante un mismo día.

Conclusiones

Se ha caracterizado hidrodinámicamente los diferentes modelos de tanque propuestos y se ha analizado el comportamiento de la biomasa de algas en el interior de cada uno ellos. Se ha establecido la relación entre el caudal, la velocidad de entrada de agua y la velocidad angular de las algas para el modelo de tanque 1.

Se observó como para el modelo de tanque 1, la densidad de cultivo tiene poca relación con la velocidad de rotación. En cambio se aprecia grandes diferencias en la fuerza de impulso necesaria para iniciar el movimiento a diferentes densidades de cultivo.

En el modelo de tanque 3, se observa una gran influencia de la densidad de cultivo en la velocidad de rotación que alcanza la biomasa. Además, también es notoria esta influencia en la potencia necesaria para iniciar el movimiento a diferentes densidades de cultivo.

Se ha determinado que, a pesar de presentar unos requerimientos de potencia más elevados, en el modelo de tanque 1, se observan velocidades de rotación de la biomasa muy superiores a las alcanzadas en el modelo de tanque 3. Este hecho se debe probablemente a las diferencias en la capacidad de ambos modelos.

Se ha establecido, mediante ajuste potencial, la relación entre la fuerza de impulso y la velocidad de rotación de la biomasa. A medida que se aumenta la densidad de cultivo y el tamaño de las algas, el comportamiento mecánico de la mezcla agua-algas va asemejándose cada vez más al comportamiento de una masa sólida.

Se ha realizado una comparación del comportamiento de la biomasa en función de su morfología. Se ha observado como los resultados numéricos son muy similares para el modelo de tanque 1. Para el modelo de tanque 3, se ha observado como la morfología presentada por *Ulva ohnoi* ha alcanzado velocidades de rotación más elevadas para las diferentes concentraciones de biomasa estudiadas. En ambos casos, la distribución de la biomasa en el tanque fue mucho más uniforme para *Ulva ohnoi* que para *Ulva fasciata*, cosa que nos indica que la morfología es un aspecto importante a tener en cuenta, ya que la morfología de *Ulva ohnoi*, fraccionada en pequeñas láminas, aprovecha mejor la radiación disponible que llega al tanque de cultivo.

También se ha observado como la morfología presentada por *Ulva ohnoi*, presenta unos requerimientos de fuerza de impulso y potencia mínima necesaria para elevar y mantener la biomasa en rotación inferiores a la morfología presentada por *Ulva fasciata*.

Durante la realización del cultivo de *Ulva fasciata*, se ha observado como las oscilaciones de temperatura experimentadas en pequeños intervalos de tiempo, afectan muy negativamente al crecimiento de esta especie. Para la integración de esta especie en un cultivo de IMTA sería necesario un control exhaustivo de la temperatura.

Bibliografía

Abreu, M. H., Pereira, R., Yarish, C., Buschmann, A. H., & Sousa-Pinto, I. (2011). IMTA with *Gracilaria vermiculophylla*: productivity and nutrient removal performance of the seaweed in a land-based pilot scale system. *Aquaculture*, 312(1), 77-87.

Aguilar-Rosas, Raúl, Luis E. Aguilar-Rosas, and Francisco F. Pedroche. "Ulva fasciata Delile (Ulvaceae, Chlorophycota): a species newly introduced into Pacific Mexico." *Botanica marina* 48.1 (2005): 46-51.

Algaebase.2015.[Web en línea] [Consulta: 19 de Agosto de 2015] Disponible en: <http://www.algaebase.org/>

Altamirano, Maria, Antonio Flores-Moya, and Félix L. Figueroa. "Effects of UV radiation and temperature on growth of germlings of three species of *Fucus* (Phaeophyceae)." *Aquatic Botany* 75.1 (2003): 9-20.

Alvarado-Morales, M., Boldrin, A., Karakashev, D. B., Holdt, S. L., Angelidaki, I., & Astrup, T. (2013). Life cycle assessment of biofuel production from brown seaweed in Nordic conditions. *Bioresource technology*, 129, 92-99.

Bostock, J., McAndrew, B., Richards, R., Jauncey, K., Telfer, T., Lorenzen, K., ... & Corner, R. (2010). Aquaculture: global status and trends. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 2897-2912.

Bowles, D. "Micro-and macro-algae: utility for industrial applications." Outputs from the EPOBIO project (2007).

Bruhn, A., Dahl, J., Nielsen, H. B., Nikolaisen, L., Rasmussen, M. B., Markager, S., ... & Jensen, P. D. (2011). Bioenergy potential of *Ulva lactuca*: Biomass yield, methane production and combustion. *Bioresource Technology*, 102(3), 2595-2604.

Carl, Christina, Rocky de Nys, and Nicholas A. Paul. "The seeding and cultivation of a tropical species of filamentous *Ulva* for algal biomass production." (2014): e98700.

Chávez-Crooker, Pamela, and Johanna Obreque-Contreras. "Bioremediation of aquaculture wastes." *Current Opinion in Biotechnology* 21.3 (2010): 313-317.

Chopin, T., Buschmann, A. H., Halling, C., Troell, M., Kautsky, N., Neori, A., ... & Neefus, C. (2001). Integrating seaweeds into marine aquaculture systems: a key toward sustainability. *Journal of Phycology*, 37(6), 975-986.

Cole, Andrew J., Rocky de Nys, and Nicholas A. Paul. "Removing constraints on the biomass production of freshwater macroalgae by manipulating water exchange to manage nutrient flux." (2014): e101284.

Coste, O., Malta, E. J., López, J. C., & Fernández-Díaz, C. (2015). Production of sulfated oligosaccharides from the seaweed *Ulva* sp. using a new ulvan-degrading enzymatic bacterial crude extract. *Algal Research*, 10, 224-231.

FAO (2014). Estado de la pesca y la acuicultura 2014. [En línea] [Consulta: 23 de Mayo de 2015]. Disponible en: www.fao.org/3/a-i3720s.pdf

Fei, Xiugeng. "Solving the coastal eutrophication problem by large scale seaweed cultivation." *Hydrobiologia* 512.1-3 (2004): 145-151.

Flo, Victor, "Diseño de un tanque no aireado para el cultivo de macroalgas. Aplicación al tratamiento de agua de un sistema de recirculación acuícola." Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 2013. Trabajo final de grado presentado en la Universidad Politécnica de Cataluña.

Herrero, Miguel, and Elena Ibáñez. "Green processes and sustainability: An overview on the extraction of high added-value products from seaweeds and microalgae." *The Journal of Supercritical Fluids* 96 (2015): 211-216.

Lordan, Sinéad, R. Paul Ross, and Catherine Stanton. "Marine bioactives as functional food ingredients: potential to reduce the incidence of chronic diseases." *Marine drugs* 9.6 (2011): 1056-1100

López-Agüero, L., Storni, M. M., Zaccaro, M. C., Stella, A. M., & Zulpa, G. *Spirulina (Arthrospira) platensis* en la prevención del fotodaño celular producido por luz ultravioleta en ratones CF1. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*.

Morand, Philippe, and Michel Merceron. "Macroalgal population and sustainability." *Journal of coastal research* (2005): 1009-1020.

Neori, Amir, Muki Shpigel, and David Ben-Ezra. "A sustainable integrated system for culture of fish, seaweed and abalone." *Aquaculture* 186.3 (2000): 279-291.

Neori, A., Chopin, T., Troell, M., Buschmann, A. H., Kraemer, G. P., Halling, C., ... & Yarish, C. (2004). Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. *Aquaculture*, 231(1), 361-391.

Oca, J., Masaló, I., 2007b. Use of the "Tank Resistance Coefficient" to evaluate modifications of water inlet devices in rotating flow tanks. In: *Aquaculture Europe 2007. Book of Abstracts. European Aquaculture Society, Turkey*, pp. 395–396.

Ogbonda, Kemka H., Rebecca E. Aminigo, and Gideon O. Abu. "Influence of aeration and lighting on biomass production and protein biosynthesis in a *Spirulina* sp. isolated

from an oil-polluted brackish water marsh in the Niger Delta, Nigeria." *African Journal of Biotechnology* 6.22 (2007).

Ochoa Bautista Raúl y Ortega Rivas César (2009) ¿Puede la agricultura cubrir el crecimiento de la demanda de alimentos? [En línea] *Claridades Agropecuarias* no. 196,p 3-7 [Consulta: 27 de Mayo de 2015] Disponible en: <http://www.infoaserca.gob.mx/claridades/revistas/196/ca196.pdf>

Pedersen, Morten Foldager, Jens Borum, and F. Leek Fotel. "Phosphorus dynamics and limitation of fast and slow-growing temperate seaweeds in Oslofjord, Norway." *Marine Ecology Progress Series* 399 (2009): 103.

Pereira, H., Barreira, L., Figueiredo, F., Custódio, L., Vizetto-Duarte, C., Polo, C., ... & Varela, J. (2012). Polyunsaturated fatty acids of marine macroalgae: potential for nutritional and pharmaceutical applications. *Marine drugs*, 10(9), 1920-1935.

Public, A., & Association, H. (1992). *APHA Method 4500-NO3: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 552.

Rebours, C., Marinho-Soriano, E., Zertuche-González, J. A., Hayashi, L., Vásquez, J. A., Kradolfer, P., ... & Robledo, D. (2014). Seaweeds: an opportunity for wealth and sustainable livelihood for coastal communities. *Journal of applied phycology*, 26(5), 1939-1951.

Shao, P., Zhu, Y., Qin, M., Fang, Z., & Sun, P. (2015). Hydrodynamic behavior and dilute solution properties of *Ulva fasciata* algae polysaccharide. *Carbohydrate Polymers*, 134, 566-572.

Troell, Max. "Integrated mariculture: its role in future aquaculture development." *FAO/NACA Regional Workshop on the Future of Mariculture: A Regional Approach for Responsible Development in the Asia Pacific Region (Guangzhou, China. 7–11 March, 2006):* *FAO Fish. Proc. No. 11*. 2008

Valente, L. M. P., Gouveia, A., Rema, P., Matos, J., Gomes, E. F., & Pinto, I. S. (2006). Evaluation of three seaweeds *Gracilaria bursa-pastoris*, *Ulva rigida* and *Gracilaria cornea* as dietary ingredients in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles. *Aquaculture*, 252(1), 85-91.

Vijayaraghavan, K., and Umid Man Joshi. "Application of *Ulva* sp. biomass for single and binary biosorption of chromium (III) and manganese (II) ions: Equilibrium modeling." *Environmental Progress & Sustainable Energy* 33.1 (2014): 147-153.

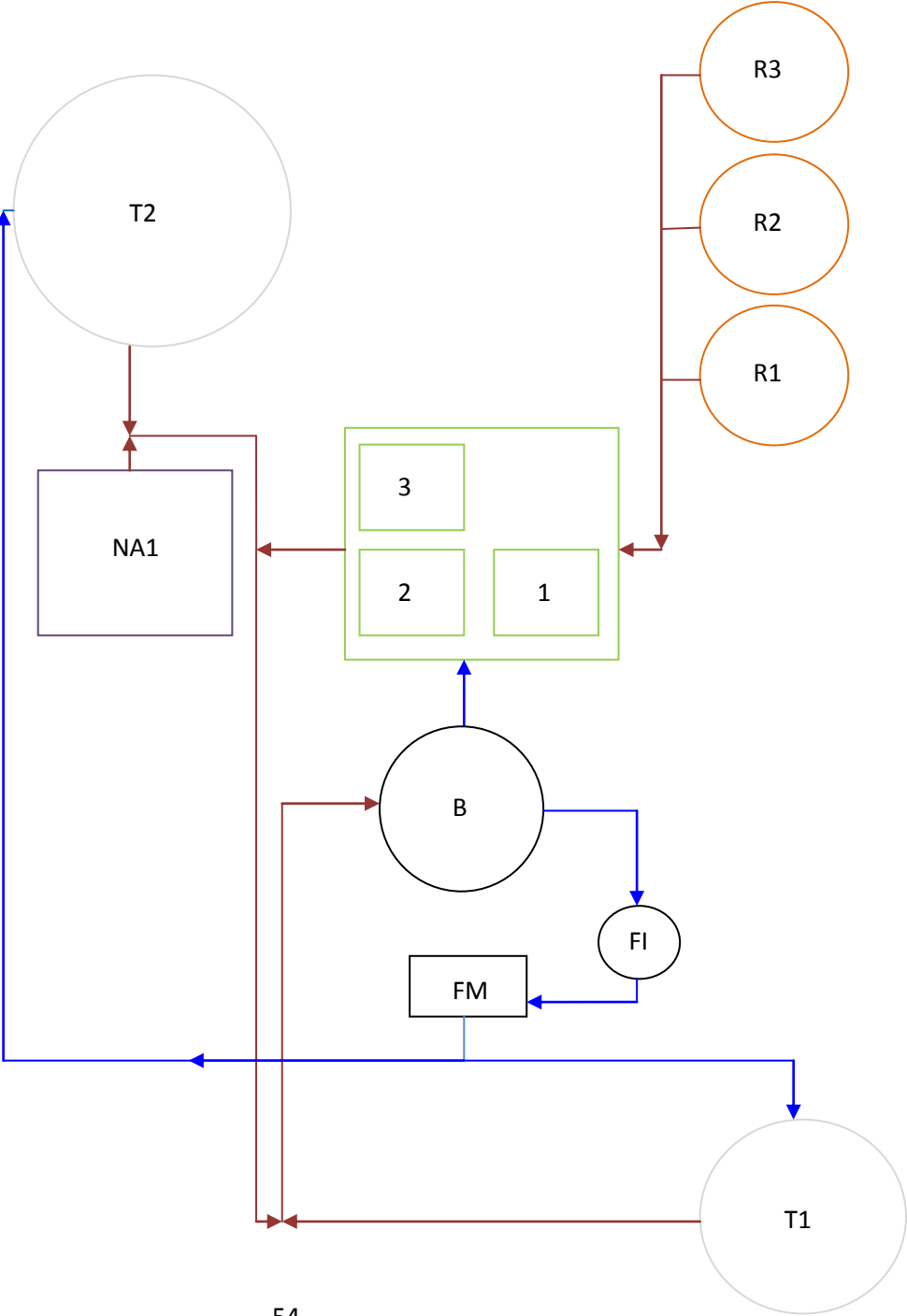
Wichard, T., Charrier, B., Mineur, F., Bothwell, J. H., De Clerck, O., & Coates, J. C. (2015). The green seaweed *Ulva*: a model system to study morphogenesis. *Frontiers in plant science*, 6.

Wu, H., Huo, Y., Han, F., Liu, Y., & He, P. (2015). Bioremediation using *Gracilaria chouae* co-cultured with *Sparus macrocephalus* to manage the nitrogen and phosphorous balance in an IMTA system in Xiangshan Bay, China. *Marine pollution bulletin*, 91(1), 272-279.

Anexos

Anexo 1. Esquema de la instalación.

1, 2, 3	Tanque modelo 1
R1, 2, 3	Tanque modelo 3
NA1	Tanque modelo 2
FI	Bomba
B	Biofiltro
FM	Filtro de malla
T1	Tanque Lenguados
T2	Tanque Lubinas



Anexo 2. Tablas de resultados.

Fase de crecimiento, eliminación de nitrógeno y eliminación de fósforo.

		10*SG R	Incremento [g/m ² ·día]	N-Uptake [g NO ₃ /semana]	N-Uptake [g NO ₃ /m ² ·semana]	Concentración N-NO ₃ inicial [mg/l]	P-Uptake [mg P/semana]	Densidad (kg/m ²)
23/03/2015	17/03 a 23/03	6,034	8,482	0,251	38,96	10	12,533	0,43
30/03/2015	27/03 a 30/03	8,455	24,107	0,436	26,80	10	8,623	0,66
06/04/2015	01/04 a 06/04	3,497	23,884	0,897	277,22	20	89,18	0,82
13/04/2015	07/04 a 13/04	-0,879	-6,295	0,906	341,93	20	110	0,78
20/04/2015	14/04 a 20/04	4,319	39,598	0,761	68,58	20	22,062	1,06
27/04/2015	21/04 a 27/04	3,666	38,795	1,036	412,81	20	132,8	1,33
04/05/2015	28/04 a 04/05	1,082	30	1,385	87,97	20	28,3	1,43
11/05/2015	05/05 a 11/05	5,087	39,087	1,621	353,06	30	113,58	0,72
18/05/2015	12/05 a 18/05	2,701	29,665	1,121	115,80	30	74,506	0,99
25/05/2015	19/05 a 25/05	0,354	3,906	0,869	96,38	30	31,005	1,25

Caracterización modelo 1 para *Ulva fasciata*. Biomasa 90 g

				Tiempo en rotar 5 veces a lo largo del tanque												
				Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Repetición 4						
Caudal [l/h]	Caudal [m3/s]	Velocidad de salida [m/s]	Fuerza de impulso [N]	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Ω	sd	Ω^2	H (m)	W (W)
200	5,56E-05	1,94	1,078E-01	71,5	4,20	67,4	4,45	73,9	4,06	64,3	4,67	4,343	0,269	18,862	0,192	0,021
220	6,11E-05	2,13	1,305E-01	57,1	5,25	62,6	4,79	59,4	5,05	52,5	5,71	5,203	0,390	27,069	0,232	0,028
240	6,67E-05	2,33	1,552E-01	46,4	6,47	48,5	6,19	49,8	6,02	50,2	5,98	6,163	0,221	37,980	0,276	0,036
260	7,22E-05	2,52	1,822E-01	46,2	6,49	44,7	6,71	44	6,82	51,6	5,81	6,459	0,451	41,722	0,324	0,046
280	7,78E-05	2,72	2,113E-01	38,8	7,73	45,3	6,62	41,2	7,28	39,2	7,65	7,322	0,506	53,616	0,376	0,057
300	8,33E-05	2,91	2,426E-01	34,8	8,62	38,9	7,71	35,5	8,45	34,1	8,80	8,395	0,477	70,481	0,432	0,071
320	8,89E-05	3,10	2,760E-01	34,2	8,77	36,9	8,13	35,7	8,40	33,7	8,90	8,552	0,352	73,134	0,491	0,086
340	9,44E-05	3,30	3,116E-01	31,3	9,58	29,9	10,03	31,2	9,62	30,7	9,77	9,751	0,205	95,089	0,555	0,103
360	1,00E-04	3,49	3,493E-01	30,9	9,71	28,4	10,56	28,8	10,42	30,5	9,84	10,131	0,422	102,641	0,622	0,122
380	1,06E-04	3,69	3,892E-01	27,7	10,83	28,9	10,38	29,7	10,10	27,2	11,03	10,585	0,422	112,049	0,693	0,144
400	1,11E-04	3,88	4,312E-01	26,8	11,19	27,7	10,83	25,9	11,58	27,1	11,07	11,169	0,314	124,755	0,768	0,167
420	1,17E-04	4,08	4,755E-01	25,1	11,95	23,4	12,82	23,7	12,66	22,9	13,10	12,633	0,489	159,589	0,846	0,194
440	1,22E-04	4,27	5,218E-01	22,5	13,33	22,1	13,57	23,4	12,82	22,7	13,22	13,236	0,315	175,194	0,929	0,223
460	1,28E-04	4,46	5,703E-01	22,7	13,22	20,5	14,63	21,4	14,02	21,7	13,82	13,923	0,584	193,861	1,015	0,255
480	1,33E-04	4,66	6,210E-01	20,8	14,42	20,5	14,63	21,1	14,22	20,9	14,35	14,407	0,174	207,571	1,106	0,289
500	1,39E-04	4,85	6,738E-01	20,2	14,85	20,3	14,78	19,1	15,71	19,4	15,46	15,200	0,457	231,044	1,200	0,327

Caracterización modelo 1 *Ulva fasciata*. Biomasa 180 g

				Tiempo en rotar 5 veces a lo largo del tanque												
				Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Repetición 4						
Caudal [l/h]	Caudal [m3/s]	Velocidad de salida [m/s]	Fuerza de impulso [N]	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Ω	sd	Ω^2	H (m)	W (W)
225	6,25E-05	2,18	1,36E-01	60,6	4,95	61,9	4,85	63	4,76	62,5	4,80	4,840	0,082	23,423	0,243	0,030
250	6,94E-05	2,43	1,68E-01	50,7	5,92	50,1	5,99	53,1	5,65	50,5	5,94	5,874	0,152	34,502	0,300	0,041
275	7,64E-05	2,67	2,04E-01	45,1	6,65	45,9	6,54	43,1	6,96	45,3	6,62	6,693	0,185	44,793	0,363	0,054
300	8,33E-05	2,91	2,43E-01	36,7	8,17	38,5	7,79	39,6	7,58	39,8	7,54	7,770	0,292	60,373	0,432	0,071
325	9,03E-05	3,15	2,85E-01	33,4	8,98	34,1	8,80	34	8,82	35,1	8,55	8,788	0,180	77,221	0,507	0,090
350	9,72E-05	3,40	3,30E-01	31,7	9,46	32,4	9,26	31,9	9,40	31,6	9,49	9,405	0,104	88,459	0,588	0,112
375	1,04E-04	3,64	3,79E-01	29,7	10,10	29,5	10,17	30,1	9,97	29,8	10,07	10,076	0,084	101,528	0,675	0,138
400	1,11E-04	3,88	4,31E-01	29	10,34	28,2	10,64	27,8	10,79	28,3	10,60	10,594	0,185	112,229	0,768	0,167
425	1,18E-04	4,12	4,87E-01	25,6	11,72	25,9	11,58	25,5	11,76	25,3	11,86	11,731	0,114	137,617	0,867	0,201
450	1,25E-04	4,37	5,46E-01	24,1	12,45	23,3	12,88	23,8	12,61	23,4	12,82	12,687	0,198	160,968	0,972	0,238
475	1,32E-04	4,61	6,08E-01	22,1	13,57	22	13,64	21,8	13,76	22,3	13,45	13,606	0,128	185,133	1,083	0,280
500	1,39E-04	4,85	6,74E-01	20,2	14,85	20,1	14,93	21,2	14,15	20,7	14,49	14,605	0,357	213,310	1,200	0,327

Caracterización modelo 1 *Ulva fasciata*. Biomasa 270 g

				Tiempo en rotar 5 veces a lo largo del tanque												
				Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Repetición 4						
Caudal [l/h]	Caudal [m3/s]	Velocidad de salida [m/s]	Fuerza de impulso [N]	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Ω	sd	Ω^2	H (m)	W (W)
300	8,33E-05	2,91	2,43E-01	44,3	6,77	43,6	6,88	43,2	6,94	42,9	6,99	6,898	0,095	47,576	0,432	0,071
325	9,03E-05	3,15	2,85E-01	38,7	7,75	37,6	7,98	38,1	7,87	37,4	8,02	7,907	0,120	62,513	0,507	0,090
350	9,72E-05	3,40	3,30E-01	33,9	8,85	33,6	8,93	34,3	8,75	34,7	8,65	8,793	0,123	77,308	0,588	0,112
375	1,04E-04	3,64	3,79E-01	31,2	9,62	31	9,68	31,7	9,46	30,7	9,77	9,632	0,129	92,778	0,675	0,138
400	1,11E-04	3,88	4,31E-01	29	10,34	29,1	10,31	28,4	10,56	28,1	10,68	10,473	0,176	109,692	0,768	0,167
425	1,18E-04	4,12	4,87E-01	26,1	11,49	26,8	11,19	25,4	11,81	25,9	11,58	11,521	0,255	132,724	0,867	0,201
450	1,25E-04	4,37	5,46E-01	23,5	12,77	24,2	12,40	24,6	12,20	24	12,50	12,464	0,238	155,362	0,972	0,238
475	1,32E-04	4,61	6,08E-01	23,1	12,99	22,7	13,22	22,8	13,16	21,9	13,70	13,265	0,305	175,956	1,083	0,280
500	1,39E-04	4,85	6,74E-01	20,1	14,93	19,7	15,23	21,8	13,76	21,5	13,95	14,467	0,719	209,300	1,200	0,327

Caracterización modelo 1 *Ulva fasciata*. Biomasa 360 g.

				Tiempo en rotar 5 veces a lo largo del tanque												
				Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Repetición 4						
Caudal [l/h]	Caudal [m3/s]	Velocidad de salida [m/s]	Fuerza de impulso [N]	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Ω	sd	Ω^2	H (m)	W (W)
325	9,03E-05	3,15	2,85E-01	37	8,11	37,5	8,00	37,9	7,92	36,8	8,15	8,044	0,107	64,705	0,507	0,090
350	9,72E-05	3,40	3,30E-01	33,2	9,04	34	8,82	34,1	8,80	33,7	8,90	8,890	0,107	79,029	0,588	0,112
375	1,04E-04	3,64	3,79E-01	31,3	9,58	29,3	10,24	30,4	9,87	30	10,00	9,923	0,273	98,466	0,675	0,138
400	1,11E-04	3,88	4,31E-01	28,6	10,49	27,2	11,03	26,7	11,24	27,1	11,07	10,956	0,324	120,039	0,768	0,167
425	1,18E-04	4,12	4,87E-01	25,2	11,90	25,7	11,67	24,6	12,20	25,1	11,95	11,931	0,214	142,356	0,867	0,201
450	1,25E-04	4,37	5,46E-01	24,1	12,45	23,2	12,93	23,5	12,77	23,9	12,55	12,674	0,216	160,639	0,972	0,238
475	1,32E-04	4,61	6,08E-01	21,6	13,89	21,2	14,15	21,3	14,08	22,1	13,57	13,925	0,259	193,899	1,083	0,280
500	1,39E-04	4,85	6,74E-01	18,6	16,13	19,1	15,71	18,7	16,04	18,9	15,87	15,938	0,187	254,017	1,200	0,327

Caracterización modelo 1 *Ulva ohnoi*. Biomasa 90 g.

				Tiempo en rotar 5 veces a lo largo del tanque													
				Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Repetición 4							
Caudal [l/h]	Caudal [m3/s]	Velocidad de salida [m/s]	Fuerza de impulso [N]	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Ω	sd	Ω ²	H (m)	W (W)	W
160	4,44E-05	1,55	6,900E-02	70,5	4,26	71,5	4,20	73	4,11	71	4,23	4,197	0,063	17,611	0,123	0,011	0,103
180	5,00E-05	1,75	8,733E-02	67	4,48	68,5	4,38	68,1	4,41	67,5	4,44	4,427	0,043	19,596	0,155	0,015	0,124
200	5,56E-05	1,94	1,078E-01	63,5	4,72	65,5	4,58	64,3	4,67	65,5	4,58	4,638	0,071	21,507	0,192	0,021	0,145
220	6,11E-05	2,13	1,305E-01	53,5	5,61	55	5,45	58,5	5,13	60	5,00	5,298	0,282	28,064	0,232	0,028	0,167
240	6,67E-05	2,33	1,552E-01	49,5	6,06	51	5,88	53	5,66	53,4	5,62	5,805	0,206	33,702	0,276	0,036	0,190
260	7,22E-05	2,52	1,822E-01	43	6,98	45,5	6,59	47	6,38	48,5	6,19	6,535	0,339	42,702	0,324	0,046	0,214
280	7,78E-05	2,72	2,113E-01	42	7,14	40,5	7,41	40,5	7,41	41	7,32	7,319	0,125	53,563	0,376	0,057	0,240
300	8,33E-05	2,91	2,426E-01	38	7,89	39,5	7,59	37	8,11	37	8,11	7,926	0,243	62,829	0,432	0,071	0,266
320	8,89E-05	3,10	2,760E-01	34,5	8,70	35,5	8,45	36,5	8,22	36,5	8,22	8,396	0,228	70,496	0,491	0,086	0,293
340	9,44E-05	3,30	3,116E-01	33,5	8,96	33	9,09	33,2	9,04	33,1	9,06	9,036	0,059	81,657	0,555	0,103	0,321
360	1,00E-04	3,49	3,493E-01	31,4	9,55	31,2	9,62	31,9	9,40	31,6	9,49	9,517	0,090	90,571	0,622	0,122	0,349
380	1,06E-04	3,69	3,892E-01	28,1	10,68	28,7	10,45	29,2	10,27	29,3	10,24	10,410	0,200	108,379	0,693	0,144	0,379
400	1,11E-04	3,88	4,312E-01	25,5	11,76	26	11,54	26,5	11,32	27	11,11	11,434	0,281	130,731	0,768	0,167	0,409
420	1,17E-04	4,08	4,755E-01	23,5	12,77	23,5	12,77	25,5	11,76	25,5	11,76	12,265	0,578	150,438	0,846	0,194	0,440
440	1,22E-04	4,27	5,218E-01	22	13,64	21,5	13,95	22,5	13,33	23	13,04	13,492	0,392	182,025	0,929	0,223	0,472
460	1,28E-04	4,46	5,703E-01	21,5	13,95	21	14,29	21,5	13,95	20,5	14,63	14,207	0,325	201,831	1,015	0,255	0,505
480	1,33E-04	4,66	6,210E-01	20,5	14,63	20	15,00	19,5	15,38	20	15,00	15,005	0,306	225,141	1,106	0,289	0,538
500	1,39E-04	4,85	6,738E-01	19	15,79	18,5	16,22	18,5	16,22	18	16,67	16,222	0,358	263,158	1,200	0,327	0,572

Caracterización modelo 1 *Ulva ohnoi*. Biomasa 180 g

				Tiempo en rotar 5 veces a lo largo del tanque												
				Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Repetición 4						
Caudal [l/h]	Caudal [m3/s]	Velocidad de salida [m/s]	Fuerza de impulso [N]	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Ω	sd	Ω^2	H (m)	W (W)
200	5,56E-05	1,94	1,08E-01	58,7	5,11	59,2	5,07	59,5	5,04	58,9	5,09	5,078	0,030	25,790	0,192	0,021
225	6,25E-05	2,18	1,36E-01	55,3	5,42	56,4	5,32	56,1	5,35	55,6	5,40	5,372	0,047	28,857	0,243	0,030
250	6,94E-05	2,43	1,68E-01	47,9	6,26	48,1	6,24	47,6	6,30	48	6,25	6,263	0,028	39,227	0,300	0,041
275	7,64E-05	2,67	2,04E-01	42,1	7,13	42,7	7,03	41,9	7,16	42,1	7,13	7,109	0,058	50,543	0,363	0,054
300	8,33E-05	2,91	2,43E-01	34,8	8,62	35	8,57	34,6	8,67	34,7	8,65	8,627	0,042	74,426	0,432	0,071
325	9,03E-05	3,15	2,85E-01	31,2	9,62	31,4	9,55	30,7	9,77	30,8	9,74	9,670	0,103	93,517	0,507	0,090
350	9,72E-05	3,40	3,30E-01	29,8	10,07	29,1	10,31	28,9	10,38	29,3	10,24	10,249	0,134	105,042	0,588	0,112
375	1,04E-04	3,64	3,79E-01	27,6	10,87	27,3	10,99	27,1	11,07	27,3	10,99	10,979	0,083	120,548	0,675	0,138
400	1,11E-04	3,88	4,31E-01	24,3	12,35	24,7	12,15	24,3	12,35	25	12,00	12,209	0,168	149,066	0,768	0,167
425	1,18E-04	4,12	4,87E-01	23,9	12,55	23,5	12,77	23,2	12,93	23,4	12,82	12,767	0,159	163,008	0,867	0,201
450	1,25E-04	4,37	5,46E-01	22,7	13,22	21,9	13,70	22	13,64	21,7	13,82	13,594	0,264	184,795	0,972	0,238
475	1,32E-04	4,61	6,08E-01	21,9	13,70	21,4	14,02	21,3	14,08	21,1	14,22	14,005	0,220	196,139	1,083	0,280
500	1,39E-04	4,85	6,74E-01	20,6	14,56	19,7	15,23	20,2	14,85	19,6	15,31	14,987	0,346	224,619	1,200	0,327

Caracterización modelo 1 *Ulva ohnoi*. Biomasa 270 g

				Tiempo en rotar 5 veces a lo largo del tanque												
				Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Repetición 4						
Caudal [l/h]	Caudal [m3/s]	Velocidad de salida [m/s]	Fuerza de impulso [N]	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Ω	sd	Ω^2	H (m)	W (W)
250	6,94E-05	2,43	1,68E-01	55,2	5,43	57,8	5,19	56,9	5,27	56,3	5,33	5,307	0,103	28,159	0,300	0,041
275	7,64E-05	2,67	2,04E-01	48,7	6,16	51,2	5,86	51,6	5,81	49,8	6,02	5,964	0,159	35,574	0,363	0,054
300	8,33E-05	2,91	2,43E-01	41,3	7,26	42	7,14	41,6	7,21	41,7	7,19	7,203	0,050	51,885	0,432	0,071
325	9,03E-05	3,15	2,85E-01	36,8	8,15	36,1	8,31	36,4	8,24	36,5	8,22	8,231	0,065	67,747	0,507	0,090
350	9,72E-05	3,40	3,30E-01	31,2	9,62	30,7	9,77	31,1	9,65	30,9	9,71	9,686	0,069	93,811	0,588	0,112
375	1,04E-04	3,64	3,79E-01	28,9	10,38	28,3	10,60	28,9	10,38	28,4	10,56	10,481	0,117	109,858	0,675	0,138
400	1,11E-04	3,88	4,31E-01	26,4	11,36	25,9	11,58	26,3	11,41	26,2	11,45	11,451	0,095	131,125	0,768	0,167
425	1,18E-04	4,12	4,87E-01	25,1	11,95	25,2	11,90	24,9	12,05	25,1	11,95	11,964	0,060	143,145	0,867	0,201
450	1,25E-04	4,37	5,46E-01	23,2	12,93	23,3	12,88	23,6	12,71	23,2	12,93	12,862	0,104	165,440	0,972	0,238
475	1,32E-04	4,61	6,08E-01	21,4	14,02	21,3	14,08	21	14,29	21,7	13,82	14,053	0,190	197,499	1,083	0,280
500	1,39E-04	4,85	6,74E-01	19,6	15,31	19,2	15,63	20,1	14,93	19,8	15,15	15,252	0,294	232,624	1,200	0,327

Caracterización modelo 1 *Ulva ohnoi*. Biomasa 360 g

				Tiempo en rotar 5 veces a lo largo del tanque												
				Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Repetición 4						
Caudal [l/h]	Caudal [m3/s]	Velocidad de salida [m/s]	Fuerza de impulso [N]	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Ω	sd	Ω^2	H (m)	W (W)
300	8,33E-05	2,91	2,43E-01	43	6,98	43,7	6,86	42,9	6,99	43,1	6,96	6,949	0,057	48,286	0,432	0,071
325	9,03E-05	3,15	2,85E-01	38,2	7,85	36,4	8,24	36,7	8,17	36,1	8,31	8,145	0,202	66,340	0,507	0,090
350	9,72E-05	3,40	3,30E-01	32,1	9,35	32,5	9,23	33	9,09	32,8	9,15	9,203	0,111	84,704	0,588	0,112
375	1,04E-04	3,64	3,79E-01	29,7	10,10	29,4	10,20	29,3	10,24	29,3	10,24	10,196	0,065	103,953	0,675	0,138
400	1,11E-04	3,88	4,31E-01	27,8	10,79	27,4	10,95	26,8	11,19	27	11,11	11,011	0,179	121,250	0,768	0,167
425	1,18E-04	4,12	4,87E-01	24,9	12,05	25,1	11,95	24,9	12,05	24,9	12,05	12,024	0,048	144,581	0,867	0,201
450	1,25E-04	4,37	5,46E-01	23,9	12,55	23,2	12,93	23,4	12,82	23,7	12,66	12,741	0,168	162,321	0,972	0,238
475	1,32E-04	4,61	6,08E-01	21,5	13,95	21,7	13,82	21,5	13,95	21,8	13,76	13,873	0,096	192,469	1,083	0,280
500	1,39E-04	4,85	6,74E-01	19,7	15,23	19,8	15,15	19,1	15,71	19,2	15,63	15,428	0,279	238,021	1,200	0,327

Caracterización modelo 2 *Ulva ohnoi*. Biomasa 360 g.

				Tiempo en rotar 1 veces a lo largo del tanque												
				Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Repetición 4						
Caudal [l/h]	Caudal [m3/s]	Velocidad de salida [m/s]	Fuerza de impulso [N]	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Ω	sd	Ω^2	H (m)	W (W)
400	0,000	1,941	0,216	32,100	1,869	37,600	1,596	33,200	1,807	34,100	1,760	1,758	0,117	3,090	0,192	0,021
450	0,000	2,183	0,273	24,900	2,410	27,500	2,182	28,200	2,128	27,100	2,214	2,233	0,123	4,988	0,243	0,030
500	0,000	2,426	0,337	21,700	2,765	23,700	2,532	23,100	2,597	21,900	2,740	2,658	0,112	7,067	0,300	0,041
600	0,000	2,911	0,485	20,000	3,000	20,900	2,871	19,700	3,046	19,800	3,030	2,987	0,080	8,920	0,432	0,071
650	0,000	3,154	0,569	17,700	3,390	18,100	3,315	19,200	3,125	18,200	3,297	3,282	0,112	10,769	0,507	0,090
700	0,000	3,396	0,660	17,300	3,468	16,900	3,550	17,600	3,409	17,400	3,448	3,469	0,060	12,034	0,588	0,112
750	0,000	3,639	0,758	15,800	3,797	17,300	3,468	16,400	3,659	17,000	3,529	3,613	0,146	13,057	0,675	0,138
800	0,000	3,881	0,862	14,700	4,082	15,600	3,846	15,900	3,774	16,300	3,681	3,846	0,171	14,789	0,768	0,167

Caracterización modelo 2 *Ulva ohnoi*. Biomasa 720 g.

				Tiempo en rotar 1 veces a lo largo del tanque												
				Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Repetición 4						
Caudal [l/h]	Caudal [m3/s]	Velocidad de salida [m/s]	Fuerza de impulso [N]	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Ω	sd	Ω^2	H (m)	W (W)
500	0,000	2,426	0,337	25,100	2,390	27,200	2,206	27,800	2,158	26,900	2,230	2,246	0,101	5,046	0,300	0,041
600	0,000	2,911	0,485	21,300	2,817	22,400	2,679	22,000	2,727	20,700	2,899	2,780	0,097	7,730	0,432	0,071
650	0,000	3,154	0,569	19,100	3,141	18,900	3,175	18,500	3,243	17,900	3,352	3,228	0,093	10,419	0,507	0,090
700	0,000	3,396	0,660	17,900	3,352	17,700	3,390	17,100	3,509	17,600	3,409	3,415	0,067	11,662	0,588	0,112
750	0,000	3,639	0,758	16,700	3,593	16,900	3,550	15,800	3,797	16,400	3,659	3,650	0,108	13,321	0,675	0,138
800	0,000	3,881	0,862	15,800	3,797	16,000	3,750	15,200	3,947	15,500	3,871	3,841	0,086	14,757	0,768	0,167

Caracterización modelo 3 *Ulva fasciata*. Biomasa 90 g.

				Tiempo en rotar 1 veces a lo largo del tanque												
				Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Repetición 4						
Caudal [l/h]	Caudal [m3/s]	Velocidad de salida [m/s]	Fuerza de impulso [N]	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Ω	sd	Ω^2	H (m)	W (W)
100	2,778E-05	2,210	0,061													
120	3,333E-05	2,653	0,088	22,300	2,691	20,700	2,899	25,400	2,362	25,300	2,372	2,581	0,261	6,660	0,310	0,101
140	3,889E-05	3,095	0,120	18,400	3,261	19,900	3,015	20,100	2,985	19,300	3,109	3,092	0,124	9,563	0,310	0,118
160	4,444E-05	3,537	0,157	17,100	3,509	16,900	3,550	17,800	3,371	17,300	3,468	3,475	0,077	12,072	0,310	0,135
180	5,000E-05	3,979	0,199	15,000	4,000	14,800	4,054	14,700	4,082	15,700	3,822	3,989	0,117	15,915	0,310	0,152
200	5,556E-05	4,421	0,246	14,600	4,110	13,800	4,348	13,100	4,580	14,400	4,167	4,301	0,212	18,499	0,310	0,169
220	6,111E-05	4,863	0,297	12,500	4,800	12,100	4,959	11,900	5,042	12,400	4,839	4,910	0,111	24,107	0,310	0,186
240	6,667E-05	5,305	0,354	10,600	5,660	11,400	5,263	10,900	5,505	11,100	5,405	5,458	0,167	29,794	0,310	0,203
260	7,222E-05	5,747	0,415	10,900	5,505	10,500	5,714	10,200	5,882	10,700	5,607	5,677	0,161	32,230	0,310	0,220
280	7,778E-05	6,189	0,481	9,600	6,250	9,900	6,061	10,300	5,825	10,100	5,941	6,019	0,181	36,230	0,310	0,237
300	8,333E-05	6,631	0,553	10,100	5,941	9,800	6,122	8,700	6,897	9,600	6,250	6,302	0,416	39,720	0,310	0,253
320	8,889E-05	7,074	0,629	9,100	6,593	8,900	6,742	9,600	6,250	8,300	7,229	6,703	0,406	44,937	0,310	0,270
340	9,444E-05	7,516	0,710	9,300	6,452	7,800	7,692	8,100	7,407	8,600	6,977	7,132	0,541	50,866	0,310	0,287
360	1,000E-04	7,958	0,796	7,400	8,108	8,200	7,317	8,400	7,143	8,000	7,500	7,517	0,420	56,505	0,310	0,304
380	1,056E-04	8,400	0,887	7,700	7,792	7,500	8,000	8,100	7,407	8,300	7,229	7,607	0,352	57,868	0,310	0,321
400	1,111E-04	8,842	0,982	7,200	8,333	7,700	7,792	7,100	8,451	6,900	8,696	8,318	0,382	69,189	0,310	0,338

Caracterización modelo 3 *Ulva fasciata*. Biomasa 180 g

				Tiempo en rotar 1 veces a lo largo del tanque												
				Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Repetición 4						
Caudal [l/h]	Caudal [m3/s]	Velocidad de salida [m/s]	Fuerza de impulso [N]	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Ω	sd	Ω^2	H (m)	W (W)
100	2,778E-05	2,210	0,061													
120	3,333E-05	2,653	0,088	25,000	2,400	27,700	2,166	26,300	2,281	25,200	2,381	2,307	0,107	5,323	0,310	0,101
140	3,889E-05	3,095	0,120	24,700	2,429	23,200	2,586	22,500	2,667	23,900	2,510	2,548	0,102	6,493	0,310	0,118
160	4,444E-05	3,537	0,157	21,700	2,765	20,100	2,985	20,900	2,871	20,300	2,956	2,894	0,099	8,376	0,310	0,135
180	5,000E-05	3,979	0,199	19,700	3,046	18,200	3,297	18,800	3,191	18,200	3,297	3,208	0,119	10,289	0,310	0,152
200	5,556E-05	4,421	0,246	15,800	3,797	15,200	3,947	16,500	3,636	16,000	3,750	3,783	0,129	14,310	0,310	0,169
220	6,111E-05	4,863	0,297	14,500	4,138	16,100	3,727	15,300	3,922	14,700	4,082	3,967	0,185	15,737	0,310	0,186
240	6,667E-05	5,305	0,354	13,400	4,478	14,200	4,225	14,000	4,286	14,300	4,196	4,296	0,127	18,457	0,310	0,203
260	7,222E-05	5,747	0,415	12,500	4,800	13,000	4,615	12,400	4,839	13,300	4,511	4,691	0,155	22,009	0,310	0,220
280	7,778E-05	6,189	0,481	12,400	4,839	12,600	4,762	11,700	5,128	11,900	5,042	4,943	0,171	24,430	0,310	0,237
300	8,333E-05	6,631	0,553	12,100	4,959	11,200	5,357	11,500	5,217	11,600	5,172	5,176	0,165	26,795	0,310	0,253
320	8,889E-05	7,074	0,629	10,800	5,556	11,300	5,310	10,000	6,000	10,900	5,505	5,592	0,292	31,276	0,310	0,270
340	9,444E-05	7,516	0,710	10,700	5,607	10,900	5,505	10,500	5,714	10,800	5,556	5,595	0,090	31,309	0,310	0,287
360	1,000E-04	7,958	0,796	9,900	6,061	10,400	5,769	9,400	6,383	9,700	6,186	6,100	0,257	37,205	0,310	0,304
380	1,056E-04	8,400	0,887	9,600	6,250	9,400	6,383	9,100	6,593	9,100	6,593	6,455	0,169	41,666	0,310	0,321
400	1,111E-04	8,842	0,982	9,200	6,522	8,700	6,897	7,100	8,451	8,900	6,742	7,153	0,879	51,160	0,310	0,338

Caracterización modelo 3 *Ulva fasciata*. Biomasa 270 g.

				Tiempo en rotar 1 veces a lo largo del tanque												
				Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Repetición 4						
Caudal [l/h]	Caudal [m3/s]	Velocidad de salida [m/s]	Fuerza de impulso [N]	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Ω	sd	Ω^2	H (m)	W (W)
220	6,11E-05	4,863	0,297	21,700	2,765	21,800	2,752	22,200	2,703	22,000	2,727	2,737	0,028	7,490	0,310	0,186
240	6,67E-05	5,305	0,354	19,600	3,061	19,100	3,141	20,700	2,899	20,300	2,956	3,014	0,108	9,085	0,310	0,203
260	7,22E-05	5,747	0,415	16,300	3,681	17,100	3,509	16,600	3,614	16,900	3,550	3,589	0,075	12,878	0,310	0,220
280	7,78E-05	6,189	0,481	15,800	3,797	16,200	3,704	15,400	3,896	16,300	3,681	3,770	0,098	14,210	0,310	0,237
300	8,33E-05	6,631	0,553	14,400	4,167	14,700	4,082	15,100	3,974	14,200	4,225	4,112	0,109	16,907	0,310	0,253
320	8,89E-05	7,074	0,629	13,700	4,380	13,300	4,511	14,100	4,255	13,400	4,478	4,406	0,115	19,412	0,310	0,270
340	9,44E-05	7,516	0,710	12,700	4,724	13,200	4,545	12,100	4,959	12,900	4,651	4,720	0,175	22,278	0,310	0,287
360	1,00E-04	7,958	0,796	11,100	5,405	12,000	5,000	11,400	5,263	11,800	5,085	5,188	0,182	26,919	0,310	0,304
380	1,06E-04	8,400	0,887	10,800	5,556	11,100	5,405	10,900	5,505	10,400	5,769	5,559	0,154	30,899	0,310	0,321
400	1,11E-04	8,842	0,982	10,400	5,769	10,200	5,882	9,700	6,186	10,300	5,825	5,916	0,186	34,994	0,310	0,338

Caracterización modelo 3 *Ulva fasciata*. Biomasa 360 g.

				Tiempo en rotar 1 veces a lo largo del tanque												
				Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Repetición 4						
Caudal [l/h]	Caudal [m3/s]	Velocidad de salida [m/s]	Fuerza de impulso [N]	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Ω	sd	Ω^2	H (m)	W (W)
240	6,67E-05	5,305	0,354	22,900	2,620	21,400	2,804	22,000	2,727	22,300	2,691	2,710	0,076	7,346	0,310	0,203
260	7,22E-05	5,747	0,415	19,100	3,141	20,300	2,956	20,400	2,941	19,700	3,046	3,021	0,093	9,126	0,310	0,220
280	7,78E-05	6,189	0,481	17,300	3,468	17,400	3,448	17,700	3,390	18,300	3,279	3,396	0,085	11,535	0,310	0,237
300	8,33E-05	6,631	0,553	16,600	3,614	16,400	3,659	17,200	3,488	16,700	3,593	3,589	0,072	12,878	0,310	0,253
320	8,89E-05	7,074	0,629	14,700	4,082	13,900	4,317	14,400	4,167	15,100	3,974	4,135	0,145	17,095	0,310	0,270
340	9,44E-05	7,516	0,710	13,600	4,412	13,400	4,478	14,300	4,196	13,900	4,317	4,350	0,122	18,926	0,310	0,287
360	1,00E-04	7,958	0,796	13,100	4,580	13,600	4,412	12,800	4,688	13,000	4,615	4,574	0,117	20,919	0,310	0,304
380	1,06E-04	8,400	0,887	12,700	4,724	11,600	5,172	12,400	4,839	12,200	4,918	4,913	0,190	24,141	0,310	0,321
400	1,11E-04	8,842	0,982	10,500	5,714	11,300	5,310	10,700	5,607	11,600	5,172	5,451	0,253	29,713	0,310	0,338

Caracterización modelo 3 *Ulva ohnoi*. Biomasa 90 g.

				Tiempo en rotar 1 veces a lo largo del tanque												
				Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Repetición 4						
Caudal [l/h]	Caudal [m3/s]	Velocidad de salida [m/s]	Fuerza de impulso [N]	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Ω	sd	Ω^2	H (m)	W (W)
80	2,22E-05	1,768	0,039	23,5	2,553	23,1	2,597	23,9	2,510	23,2	2,586	2,562	0,039	6,563	0,310	0,068
100	2,78E-05	2,210	0,061	22,600	2,655	22,300	2,691	22,700	2,643	22,500	2,667	2,664	0,020	7,096	0,310	0,084
120	3,33E-05	2,653	0,088	20,700	2,899	20,600	2,913	21,000	2,857	20,900	2,871	2,885	0,025	8,322	0,310	0,101
140	3,89E-05	3,095	0,120	17,900	3,352	18,100	3,315	18,500	3,243	18,300	3,279	3,297	0,047	10,872	0,310	0,118
160	4,44E-05	3,537	0,157	16,300	3,681	16,700	3,593	17,100	3,509	16,600	3,614	3,599	0,071	12,955	0,310	0,135
180	5,00E-05	3,979	0,199	14,600	4,110	14,500	4,138	14,600	4,110	14,100	4,255	4,153	0,069	17,248	0,310	0,152
200	5,56E-05	4,421	0,246	13,500	4,444	13,400	4,478	13,000	4,615	13,300	4,511	4,512	0,074	20,360	0,310	0,169
220	6,11E-05	4,863	0,297	11,900	5,042	12,000	5,000	12,100	4,959	12,100	4,959	4,990	0,040	24,899	0,310	0,186
240	6,67E-05	5,305	0,354	10,200	5,882	10,700	5,607	10,800	5,556	10,500	5,714	5,690	0,144	32,375	0,310	0,203
260	7,22E-05	5,747	0,415	9,700	6,186	9,900	6,061	9,900	6,061	9,400	6,383	6,172	0,152	38,099	0,310	0,220
280	7,78E-05	6,189	0,481	8,600	6,977	8,700	6,897	8,400	7,143	8,100	7,407	7,106	0,226	50,494	0,310	0,237
300	8,33E-05	6,631	0,553	8,100	7,407	8,300	7,229	7,900	7,595	8,000	7,500	7,433	0,156	55,247	0,310	0,253
320	8,89E-05	7,074	0,629	7,400	8,108	7,700	7,792	7,300	8,219	7,500	8,000	8,030	0,182	64,479	0,310	0,270
340	9,44E-05	7,516	0,710	7,100	8,451	7,300	8,219	7,100	8,451	7,000	8,571	8,423	0,147	70,947	0,310	0,287
360	1,00E-04	7,958	0,796	7,200	8,333	7,100	8,451	7,300	8,219	7,200	8,333	8,334	0,095	69,458	0,310	0,304
380	1,06E-04	8,400	0,887	6,900	8,696	6,800	8,824	7,100	8,451	6,900	8,696	8,666	0,156	75,106	0,310	0,321
400	1,11E-04	8,842	0,982	7,000	8,571	6,900	8,696	6,700	8,955	7,100	8,451	8,668	0,216	75,139	0,310	0,338

Caracterización modelo 3 *Ulva ohnoi*. Biomasa 180 g.

				Tiempo en rotar 1 veces a lo largo del tanque												
				Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Repetición 4						
Caudal [l/h]	Caudal [m ³ /s]	Velocidad de salida [m/s]	Fuerza de impulso [N]	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Ω	sd	Ω^2	H (m)	W (W)
100	2,778E-05	2,210	0,061	23,900	2,510	23,500	2,553	23,200	2,586	23,700	2,532	2,545	0,032	6,479	0,310	0,084
120	3,333E-05	2,653	0,088	23,100	2,597	22,900	2,620	22,700	2,643	23,000	2,609	2,617	0,020	6,850	0,310	0,101
140	3,889E-05	3,095	0,120	18,400	3,261	18,700	3,209	19,000	3,158	18,900	3,175	3,200	0,045	10,243	0,310	0,118
160	4,444E-05	3,537	0,157	16,900	3,550	17,000	3,529	17,800	3,371	17,300	3,468	3,480	0,081	12,108	0,310	0,135
180	5,000E-05	3,979	0,199	15,000	4,000	14,800	4,054	14,700	4,082	15,700	3,822	3,989	0,117	15,915	0,310	0,152
200	5,556E-05	4,421	0,246	14,600	4,110	13,800	4,348	13,100	4,580	14,400	4,167	4,301	0,212	18,499	0,310	0,169
220	6,111E-05	4,863	0,297	12,500	4,800	12,100	4,959	11,900	5,042	12,400	4,839	4,910	0,111	24,107	0,310	0,186
240	6,667E-05	5,305	0,354	10,600	5,660	11,400	5,263	10,900	5,505	11,100	5,405	5,458	0,167	29,794	0,310	0,203
260	7,222E-05	5,747	0,415	10,900	5,505	10,500	5,714	10,200	5,882	10,700	5,607	5,677	0,161	32,230	0,310	0,220
280	7,778E-05	6,189	0,481	9,600	6,250	9,900	6,061	10,300	5,825	10,100	5,941	6,019	0,181	36,230	0,310	0,237
300	8,333E-05	6,631	0,553	10,100	5,941	9,800	6,122	8,700	6,897	9,600	6,250	6,302	0,416	39,720	0,310	0,253
320	8,889E-05	7,074	0,629	9,100	6,593	8,900	6,742	9,600	6,250	8,300	7,229	6,703	0,406	44,937	0,310	0,270
340	9,444E-05	7,516	0,710	9,300	6,452	7,800	7,692	8,100	7,407	8,600	6,977	7,132	0,541	50,866	0,310	0,287
360	1,000E-04	7,958	0,796	7,400	8,108	8,200	7,317	8,400	7,143	8,000	7,500	7,517	0,420	56,505	0,310	0,304
380	1,056E-04	8,400	0,887	7,700	7,792	7,500	8,000	8,100	7,407	8,300	7,229	7,607	0,352	57,868	0,310	0,321
400	1,111E-04	8,842	0,982	7,200	8,333	7,700	7,792	7,100	8,451	6,900	8,696	8,318	0,382	69,189	0,310	0,338

Caracterización modelo 3 *Ulva ohnoi*. Biomasa 270 g.

				Tiempo en rotar 1 veces a lo largo del tanque												
				Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Repetición 4						
Caudal [l/h]	Caudal [m ³ /s]	Velocidad de salida [m/s]	Fuerza de impulso [N]	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Ω	sd	Ω^2	H (m)	W (W)
140	3,889E-05	3,095	0,120	22,3	2,691	22,1	2,715	22,8	2,632	22,2	2,703	2,685	0,037	7,209	0,310	0,118
160	4,444E-05	3,537	0,157	21,6	2,778	21,5	2,791	21,9	2,740	21,4	2,804	2,778	0,028	7,717	0,310	0,135
180	5,000E-05	3,979	0,199	20,400	2,941	20,100	2,985	20,800	2,885	20,300	2,956	2,942	0,042	8,653	0,310	0,152
200	5,556E-05	4,421	0,246	19,200	3,125	19,300	3,109	19,700	3,046	19,100	3,141	3,105	0,042	9,642	0,310	0,169
220	6,111E-05	4,863	0,297	18,700	3,209	18,600	3,226	19,000	3,158	18,500	3,243	3,209	0,037	10,297	0,310	0,186
240	6,667E-05	5,305	0,354	17,600	3,409	17,200	3,488	17,300	3,468	17,600	3,409	3,444	0,041	11,859	0,310	0,203
260	7,222E-05	5,747	0,415	15,900	3,774	16,100	3,727	15,700	3,822	16,000	3,750	3,768	0,041	14,198	0,310	0,220
280	7,778E-05	6,189	0,481	14,700	4,082	15,100	3,974	14,800	4,054	14,600	4,110	4,055	0,059	16,441	0,310	0,237
300	8,333E-05	6,631	0,553	13,500	4,444	13,900	4,317	13,200	4,545	13,400	4,478	4,446	0,096	19,767	0,310	0,253
320	8,889E-05	7,074	0,629	12,300	4,878	12,700	4,724	12,800	4,688	12,600	4,762	4,763	0,083	22,686	0,310	0,270
340	9,444E-05	7,516	0,710	11,100	5,405	11,600	5,172	11,500	5,217	11,400	5,263	5,265	0,101	27,716	0,310	0,287
360	1,000E-04	7,958	0,796	10,200	5,882	10,500	5,714	10,600	5,660	9,900	6,061	5,829	0,181	33,982	0,310	0,304
380	1,056E-04	8,400	0,887	9,900	6,061	9,600	6,250	9,800	6,122	9,400	6,383	6,204	0,143	38,490	0,310	0,321
400	1,111E-04	8,842	0,982	9,500	6,316	9,700	6,186	9,600	6,250	9,400	6,383	6,284	0,085	39,483	0,310	0,338

Caracterización modelo 3 *Ulva ohnoi*. Biomasa 360 g.

				Tiempo en rotar 1 veces a lo largo del tanque												
				Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Repetición 4						
Caudal [l/h]	Caudal [m ³ /s]	Velocidad de salida [m/s]	Fuerza de impulso [N]	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Tiempo [s]	rpm	Ω	sd	Ω^2	H (m)	W (W)
180	0,00005	3,979	0,199	22,700	2,643	22,300	2,691	22,800	2,632	21,900	2,740	2,676	0,049	7,162	0,310	0,152
200	5,55556E-05	4,421	0,246	20,900	2,871	21,300	2,817	21,100	2,844	21,000	2,857	2,847	0,023	8,106	0,310	0,169
220	6,11111E-05	4,863	0,297	19,800	3,030	19,400	3,093	19,700	3,046	19,500	3,077	3,061	0,029	9,372	0,310	0,186
240	6,66667E-05	5,305	0,354	18,600	3,226	18,700	3,209	18,400	3,261	18,600	3,226	3,230	0,022	10,435	0,310	0,203
260	7,22222E-05	5,747	0,415	17,500	3,429	16,900	3,550	17,100	3,509	17,200	3,488	3,494	0,051	12,208	0,310	0,220
280	7,77778E-05	6,189	0,481	16,600	3,614	16,200	3,704	16,300	3,681	16,500	3,636	3,659	0,041	13,387	0,310	0,237
300	8,33333E-05	6,631	0,553	14,900	4,027	15,100	3,974	15,400	3,896	15,000	4,000	3,974	0,056	15,794	0,310	0,253
320	8,88889E-05	7,074	0,629	13,700	4,380	13,600	4,412	13,200	4,545	13,600	4,412	4,437	0,074	19,688	0,310	0,270
340	9,44444E-05	7,516	0,710	12,900	4,651	12,700	4,724	13,000	4,615	12,800	4,688	4,670	0,047	21,805	0,310	0,287
360	0,0001	7,958	0,796	11,200	5,357	11,700	5,128	11,300	5,310	11,300	5,310	5,276	0,101	27,838	0,310	0,304
380	0,000105556	8,400	0,887	10,400	5,769	10,500	5,714	10,600	5,660	10,400	5,769	5,728	0,052	32,813	0,310	0,321
400	0,000111111	8,842	0,982	10,100	5,941	10,300	5,825	9,900	6,061	10,400	5,769	5,899	0,129	34,797	0,310	0,338